

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
GRUPO DE PESQUISAS EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEDIDA DE PARÂMETROS
DE
AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA NA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO SÉRGIO CORRÊA MOLINA

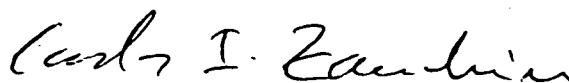
Florianópolis, Novembro de 1994

**SISTEMA AUTOMATIZADO DE MEDIDA DE PARÂMETROS DE
AMPLIFICADORES OPERACIONAIS**

PAULO SÉRGIO CORRÊA MOLINA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
ENGENHARIA BIOMÉDICA, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO.**

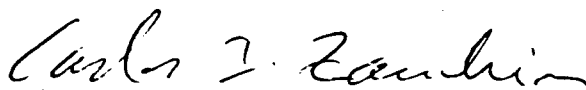


**Prof. Carlos Inacio Zanchin, M. Sc.
ORIENTADOR**



**Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.
COORDENADOR DO CURSO**

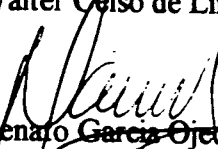
BANCA EXAMINADORA:



**Prof. Carlos Inacio Zanchin, M. Sc.
PRESIDENTE**



Prof. Walter Celso de Lima, Sc. D., L. D.



Prof. Renato Garcia Ojeda, Eng., D. Sc.



Prof. Fernando Mendes de Azevedo, D. Sc.

DEDICATÓRIA:

**Às três mulheres da minha vida:
minhas filhas, Lorryne e Lorena
e
minha esposa, Rosemeire.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Carlos Inácio Zanchin, por ter despertado meu interesse por Instrumentação Eletrônica e ter me orientado neste trabalho.

Aos colegas que tornaram o trabalho mais agradável: Dorian, Eduardo, Lourdes, Guido, Marcia, Silvia e muitos outros.

À CAPES pela bolsa que deu respaldo financeiro ao meu desenvolvimento profissional, em tempos difíceis.

Aos meus Pais, pelo auxílio financeiro inicial e constante apoio.

À Universidade de Passo Fundo (UPF), pelo afastamento , que me permitiu terminar este trabalho.

Aos meus amigos, professores da UPF, pela divisão do meu trabalho entre eles, viabilizando o afastamento.

À minha esposa, pela correção do meu "pecimo" português.

A DEUS, pela minha vida e a vida de todos a quem agradeço.

ÍNDICE ANALÍTICO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
LISTA DE TABELAS	viii
SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xi
INTRODUÇÃO	xii
CAPÍTULO 1 METODOLOGIA	17
1.1 Justificativa da metodologia adotada	17
1.2 Laço Básico de Medida.....	18
1.3 Laço completo	20
1.4 Procedimentos de medida.....	21
1.5 Variações do Laço de Medida	26
CAPÍTULO 2 DESCRIÇÃO E PROJETO DOS CIRCUITOS	31
2.1 Diagramas em blocos do sistema	31
2.2 Levantamento das faixas de medida dos parâmetros.....	33
2.3 Valores dos componentes do Laço e SAD	34
2.4 Faixas de medida implementadas	35
2.5 Compensação do Laço.....	37
CAPÍTULO 3 SOFTWARE DO MEDIDOR.....	40
3.1 Desenvolvimento do Software.....	40
3.2 Ajuste da metodologia.....	40
3.3 Fluxogramas.....	41
CAPÍTULO 4 RESULTADOS , CONCLUSÕES E SUGESTÕES	43
4.1 Resultados	43
4.2 Discussões e conclusões	45
4.3 Sugestões.....	46

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE 1 O AMPLIFICADOR OPERACIONAL	53
APÊNDICE 2 CIRCUITO COMPLETO DO INSTRUMENTO	47
APÊNDICE 3 PROCEDIMENTOS DE AJUSTE DOS CIRCUITOS	63
APÊNDICE 4 LISTAGEM DO SOFTWARE	65
APÊNDICE 5 CÁLCULOS DOS ERROS	81
APÊNDICE 6 VALORES MEDIDOS PELO PROTÓTIPO	86

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01. Sistema futuro de medição.....	xii
FIGURA 02. Versão básica do Laço de Medida.....	18
FIGURA 03. Laço básico, medida do parâmetro Vio.....	19
FIGURA 04. Laço básico, medida de Ad.....	19
FIGURA 05. Laço completo.....	20
FIGURA 06. Rotina para atingir o padrão inicial.....	21
FIGURA 07. Medida de Ib e Iio.....	23
FIGURA 08. Medida do CMRR.....	23
FIGURA 09. Medida de Ad.....	25
FIGURA 10. Medida de Vop.....	26
FIGURA 11. Versão do Laço sem compensação de Vio.....	27
FIGURA 12. Versão do Laço com SHS.....	28
FIGURA 13. Versão do Laço com S/H na realimentação.....	28
FIGURA 14. DUT ligado como ADB, para medida do CMRR.....	29
FIGURA 15. DUT com alimentação deslocada para medida do CMRR.....	30
FIGURA 16. Diagrama de blocos do sistema.....	31
FIGURA 17. Placa de Expansão.....	33
FIGURA 18. Laço para o cálculo das faixas de medida.....	34
FIGURA 19. SAD para o cálculo das faixas de medida.....	35
FIGURA 20. Laço, para o estudo da estabilidade.....	37
FIGURA 21. Diagrama de Bode do Laço não compensado.....	38
FIGURA 22. Laço compensado.....	38
FIGURA 23. Diagrama de Bode do Laço compensado.....	39
FIGURA 24. Fluxograma da rotina principal.....	41
FIGURA 25. Fluxog.: a)Teste b)Medida de parâmetros.....	42
FIGURA 26. Sugestões de medida: a)PSRR b)SR.....	47

FIGURA 27. Melhor disposição de R e CH nas entradas do DUT.	47
FIGURA 28. Compensação para medida de A_d a 1KHz.	48
FIGURA 29. Símbolo e funcionamento ideal do ampop.	53
FIGURA 30. Laço implementado.	59
FIGURA 31. Circuitos auxiliares implementados.	60
FIGURA 32. SAD implementado.	61
FIGURA 33. Interface com o PC implementada.	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Chave aberta e cálculo de I_{b+} , I_{b-} ou I_{io}	22
TABELA 2. Faixas de medida.	33
TABELA 3. Faixas e erros de medida do protótipo.	43
TABELA 4. Parâmetros de um $\mu A741$ medidos pelo protótipo.	44
TABELA 5. Parâmetros de um TL081 medidos pelo protótipo.	44
TABELA 6. Efeitos da temperatura sobre as medidas.	45

SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

+Vcc	-Tensão de alimentação positiva do DUT.
-Vcc	-Tensão de alimentação negativa do DUT.
AC	-Corrente alternada.
Acm	-Ganho de tensão de modo comum de um ampop.
Ad	-Ganho de tensão diferencial de malha aberta de um ampop.
ADB	-Amplificador Diferencial Básico ou Subtrator.
A/D	-Conversor de analógico para digital.
ampop	-Amplificador operacional.
AGP	-Amplificador de Ganho Programável.
AMUX	-Multiplexador Analógico.
AUX	-Ampop auxiliar empregado no Laço de Medida.
C	-Capacitor.
CH, S	-Chave.
CMRR	-Relação de Rejeição de Modo Comum.
CT(x)	-Coeficiente de temperatura, ou deriva, do parâmetro genérico x, que pode ser resistência, desvio de tensão, etc.
Δ , d	-Antes de uma variável significa sua variação.
D	-Diodo.
DC	-Corrente contínua.
DUT	-"Device Under Test", isto é, ampop sob teste.
e1, e2	-Tensões nas entradas inversora e não inversora do ampop.
fc1, fo	-Primeira frequência de corte do ampop, isto é, frequência de 3dB de queda de Ad.
Fig.	-Figura.
fu	-Frequência de Ad unitário.
GND	-"Ground" ou terra.
Ib	-Corrente de polarização de entrada de um ampop.

Ib+	-Corrente de polarização da entrada não inversora.
Ib-	-Corrente de polarização da entrada inversora.
Iio	-Desvio ou "offset" da corrente de entrada de um ampop.
LSB	-Bit menos significativo.
max	-Máximo.
min	-Mínimo.
Ov	-"Overshoot" ou sobrepassagem.
PSRR	-Razão de Rejeição da Fonte de Alimentação.
R	-Resistor.
Ri	-Resistência diferencial de entrada de um ampop.
Ro	-Resistência de saída de um ampop.
S, CH	-Chave.
SAD	-Sistema de Aquisição de Dados.
Sr	-"Slew rate", isto é, taxa de variação da tensão de saída de um ampop.
S/H	-"Sample/Hold", ou seja, circuito que amostra ou retém.
SHS	-S/H subtrator.
Tab.	-Tabela.
Tr	-Tempo de subida de um ampop.
Ts	-Tempo de acomodação de um ampop.
Vd	-Tensão diferencial.
Vcm	-Tensão de modo comum.
VCO	-Oscilador controlado por tensão.
Vi	-Tensão de entrada.
Vio	-Desvio ou "offset" de tensão de entrada.
Vo	-No Laço é a tensão de saída do DUT.
Vs	-Tensão de saída do AUX e entrada do S/H.
Vsh	-Tensão de saída do S/H.
Vop	-Excursão máxima de pico da tensão de saída.

RESUMO

Este trabalho descreve como transformar um microcomputador IBM-PC num instrumento dedicado à medida de parâmetros de amplificadores operacionais.

Foram desenvolvidos uma placa de expansão e um software específico para medir o desvio de tensão de entrada, desvio de corrente de entrada, corrente de polarização de entrada, ganho em malha aberta, relação de rejeição de modo comum, excursão máxima de pico da tensão de saída, e para avaliação do componente em teste para verificar se está bom ou ruim.

Para realizar os testes o usuário precisa apenas rodar o software e inserir o componente no soquete.

ABSTRACT

This work describes how to transform an IBM-PC microcomputer into a measurement instrument dedicated to measure operational amplifier parameters.

It was developed an expansion board and a specific software for measuring input offset voltage, input offset current, input bias current, open loop voltage gain, common-mode rejection ratio, maximum peak output voltage swing and for evaluation of the component under test to check if it is good or bad.

In order to implement the test the user need just to run the software and put the component into the textool.

INTRODUÇÃO

O trabalho presente, onde são medidos alguns parâmetros de amplificadores operacionais (ampops), é apenas o começo de um trabalho futuro mais amplo, que se estenderá a diversos outros circuitos integrados lineares.

Nesta introdução será definido o sistema futuro, o sistema presente, serão analisados os diversos trabalhos reunidos sobre o assunto, e comentada a organização dos capítulos.

Sistema futuro

O futuro sistema automatizado de medida, extensão do trabalho atual, será composto por um microcomputador IBM-PC ou compatível, um circuito eletrônico de alguma forma ligado a ele, um software e um soquete, conforme fig.01.

O soquete a ser utilizado ("textool") possui alavanca que permite fácil conexão, sem esforço de inserção, do componente a testar ao circuito eletrônico. O software, rodando no PC, controlará o circuito eletrônico e coletará informações dele, isto é, fará as medidas e obterá os resultados.

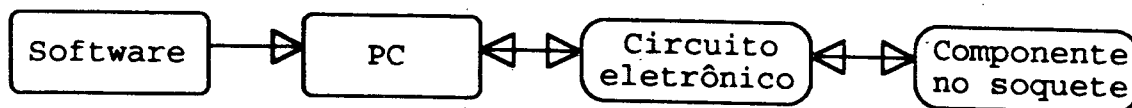


FIGURA 01. Sistema futuro de medição.

O hardware e software do instrumento deverão possibilitar as seguintes características:

- Auto teste de funcionamento do sistema.
- Teste de circuitos integrados lineares em geral tais como ampops, amplificadores de instrumentação, comparadores, etc.

-Os testes deverão prever desde a simples verificação de estado, bom ou ruim, até a medida de cada um dos parâmetros do componente, seguida de apresentação, gravação, comparações e cálculos estatísticos com esses parâmetros.

-Configuração automática do soquete conforme a função de cada pino do componente sob teste (DUT).

-Criação de bibliotecas de componentes, contendo informações da função de cada pino e parâmetros, onde o usuário poderá inserir, suprimir, alterar, consultar ou escolher o componente a testar, para que o software possa configurar o soquete e fazer comparações.

-Apresentação simples e completa dos resultados, junto às faixas definidas pelo fabricante, contidos na biblioteca, ou faixas definidas pelo próprio usuário. A apresentação poderá ser seguida de sinais sonoros de alerta para final de teste, componente bom, ruim, etc. Tais sinais aceleram o teste de grandes quantidades de componentes.

-Software baseado em menus com ajuda sobre cada item, condições de teste, etc.

-Fácil ajuste dos circuitos, através de um programa que gerencie todos os passos do usuário, ou técnico, no procedimento.

-Fácil ampliação do número de parâmetros, faixa de parâmetros e componentes possíveis de testar, isto é, projeto sempre visando expansões futuras.

-Compensação de frequência automática do DUT e possibilidade de ligação manual de algum circuito a quaisquer de seus pinos.

Sistema presente

O sistema automatizado de medida de parâmetros de ampops possibilita a medida de parâmetros como corrente de polarização, desvio de tensão (V_{io}), ganho diferencial em malha aberta (A_d), entre outros, para utilização em ensino, pesquisa, manutenção e outras aplicações gerais. O sistema permite fazer desde o simples teste de integridade de um único componente até os testes de aceitação em indústrias e laboratórios.

A nível de projeto e manutenção em Instrumentação Eletrônica é indispensável o conhecimento dos parâmetros dos componentes, em especial de ampops, que estão entre os mais utilizados nessa área.

Em aplicações específicas, onde a faixa de um dado parâmetro do ampop necessita ser mais estreita que a do fabricante, tal medidor desempenha papel fundamental.

Devido à sua grande utilidade, o ampop é objeto de pelo menos uma disciplina de graduação nos cursos de Engenharia Elétrica (Eletrônica), e por isso, a medida de seus parâmetros é uma necessidade nos laboratórios de ensino.

Os equipamentos existentes, que realizam essas medidas, são estações de teste e reconhecimento de diversos tipos de CIs, de custo elevado, impossibilitando sua aquisição, quando não é absolutamente necessário.

A solução dada neste trabalho é a transformação de um PC num versátil medidor automático de parâmetros de ampops, através de uma placa de expansão, de baixo custo, inserida num de seus slots.

Microcomputadores da linha IBM PC e compatíveis são, hoje, muito populares e de baixo custo. Além disso, o PC continua tendo as demais utilidades com a placa de expansão ligada e mesmo um PC-XT é suficiente para essa aplicação.

Revisão bibliográfica

Os diversos métodos de medida de parâmetros basicamente incluem o DUT numa malha de realimentação, com ou sem ampops auxiliares. Vários autores apresentaram o Laço de Medida com um ampop auxiliar como base dos métodos de medida da maioria dos parâmetros, principalmente os DC. Outros apresentaram métodos com circuitos próprios que possibilitam medir um único parâmetro ou pequeno grupo deles. Entre esses, os métodos de medida do ganho em malha aberta foram os mais numerosos.

William E. Shoemaker [2] apresentou o Laço de Medida com um ampop auxiliar na realimentação, mostrando o método de medida de A_d , CMRR e PSRR. Ele utilizou a configuração ADB para medir o CMRR.

Don Lewis [1] com o mesmo Laço de Medida, mostrou os métodos de medida de todos os parâmetros importantes: Vio, Ib, Iio, Vop, Ad, CMRR, PSRR, etc. Em outro trabalho [5], estudou a estabilidade do Laço e apresentou métodos de compensação, para torná-lo estável.

Charles F. Wojstaw [3] acrescentou o circuito SHS fora do Laço, para retirar parcialmente os efeitos prejudiciais do Vio do DUT e apresentou a medida do CMRR através do deslocamento da alimentação do DUT, que é mais precisa que utilizando o ADB.

G. G. Miler [4] inovou colocando um S/H na realimentação de forma a cancelar o Vio do DUT dentro do Laço, possibilitando ampliar as faixas de medida e precisão.

T.J. Byers [11,23], F. Goodenough [22], Tobey-Graeme-Huelsman [9] e Milman e Halkias [10] apresentaram diversos métodos sem ampops auxiliares na realimentação e circuitos diferentes para cada parâmetro a medir.

M Yamatake [21,31] e a revista Wireless World [32] adaptaram os métodos de medida à visualização dos parâmetros no osciloscópio. Uma possibilidade interessante nesses trabalhos é a obtenção da função de transferência, quando entrada e saída do DUT, excitado por um gerador, vão para eixos diferentes do osciloscópio.

Elizena Stein [13] apresentou um trabalho semelhante ao anterior, após reuniu e discutiu seis métodos de medida de Vio, Ib e Iio e sete métodos de medida de Ad, para selecionar os melhores.

Kôki Abe, Yôji Wakatsuki e Masato Naraoka [28] descreveram a obtenção das características em frequência de circuitos, através dos coeficientes de Fourier da entrada e saída, usando uma placa A/D de um PC para aplicar uma onda quadrada na entrada e uma D/A para digitalizar a saída.

Ikeda, Takatsuka e Yamamoto [26] apresentaram um sistema automatizado onde um PC controla um VCO que é a entrada do circuito com o DUT. A entrada e saída são digitalizadas e possibilitam calcular f_{cl} e Ad, que caracterizam completamente um ampop compensado.

N. Jaramillo [24] e [27] descreveram outro sistema automatizado onde um PC controla um gerador de sinais programável e um osciloscópio digital, na medida do "Overshoot" (Ov), "Slew

rate" (S_r), Tempo de subida (T_r) e Tempo de acomodação (T_s). O DUT, numa configuração de ganho unitário, é excitado pelo gerador e sua saída analisada pelo osciloscópio.

Barry Harvey, Elantec [25] e Willy M. C. Sansen [33] apresentaram métodos baseados em analisadores de redes, que podem analisar as tensões diretamente na entrada e saída do DUT dentro de um circuito, de forma a obter seu ganho e fase de alguns Hz a vários MHz.

Os diversos manuais de circuitos integrados lineares [14,15,18,19] contribuíram com definições e condições de teste dos parâmetros dos componentes por eles fabricados.

Conteúdo dos capítulos

O capítulo 1 introduz o circuito central do sistema (Laço de Medida), juntamente com o procedimento de medida de cada parâmetro. O capítulo 2 apresenta o sistema em diagrama de blocos (Circuito no Apêndice 2) e o projeto das partes principais, definindo a faixa de medida de cada parâmetro. No capítulo 3, o software é apresentado (Listagem no Apêndice 4). Finalmente, no Capítulo 4, são feitos comentários de resultados de medidas realizadas (Tabelas no Apêndice 6) e sugestões para implementações futuras.

CAPÍTULO 1

METODOLOGIA

Inicialmente, neste capítulo, será justificado o Laço de Medida como a metodologia adotada, e apresentada a versão básica ou didática do Laço. Em seguida será apresentada a versão mais eficiente e completa, possibilitando, após isso, descrever os procedimentos de medida de cada um dos parâmetros, cuja definições estão no Apêndice 1. Finalmente serão descritas as variações possíveis do Laço, justificando as adotadas.

1.1 Justificativa da metodologia adotada.

Vários autores da bibliografia [1,2,3,4,5,8,13,21,31] realizaram seus trabalhos baseados no clássico Laço de Medida, onde um ampop auxiliar é inserido na realimentação do DUT.

Elezena Stein [13] comentou que o emprego desse Laço foi recomendado pela norma IEC (referência [9] em seu trabalho), para medida de parâmetros DC e por diversos fabricantes.

Don Lewis [1,5], introduz um de seus trabalhos [1] com: "Felizmente, um simples circuito pode realizar todas as medidas DC padrões necessárias para testar qualquer tipo de ampop" e conclui: "Visto que o Laço de Medida de ampops funciona perfeitamente, tanto na bancada quanto com rápidos medidores automáticos, ele é universalmente usado pelos fabricantes e outros que testam ampops. O Laço de Medida é tão preciso e fácil de usar que, qualquer um, incluindo engenheiros que testam apenas umas poucas unidades na bancada, devem usa-lo."

Como o trabalho presente pretende medir os parâmetros DC: V_{io} , I_b , I_{io} , V_{op} , CMRR e A_d , o Laço de Medida é a melhor solução, pela simplicidade, precisão e minimização do hardware. A única dúvida seria em relação às medidas do CMRR e A_d que possuem outros métodos baseados em Laços, com ou sem ampops auxiliares, e geradores AC de baixa frequência, no entanto, se esses métodos fossem implementados, o hardware seria aumentado em função dos circuitos dedicados que necessitam. As medidas AC em baixa frequência são equivalentes às DC mas apresentam melhores resultados devido à eliminação das derivas DC. Para continuar com apenas um único circuito básico simples, foi modificado o método DC puro apresentado nas

referências [1,2,3,4,8], obtendo uma medida AC de CMRR e A_d com o próprio Laço, o que apresentou ótimos resultados, para baixas e médias frequências.

1.2 Laço Básico de Medida

Conforme fig.2, no clássico Laço de Medida de parâmetros de ampops, em sua versão básica [1,2], tem-se um ampop auxiliar (AUX) controlando a tensão de saída (V_o) do ampop em teste (DUT), de forma que V_o se iguale a V_c . Assim V_o é ajustado conforme o valor definido para a medida de cada parâmetro. Esse controle ocorre porque há uma realimentação negativa total nos dois ampops, através de R_2 , de forma a igualar as tensões das entradas de cada ampop. Outro comportamento importante do Laço é que o pequeno desvio de tensão $e_1 - e_2 = e_1$ aparece em V_s amplificada por 1001, devido a R_1 e R_2 .

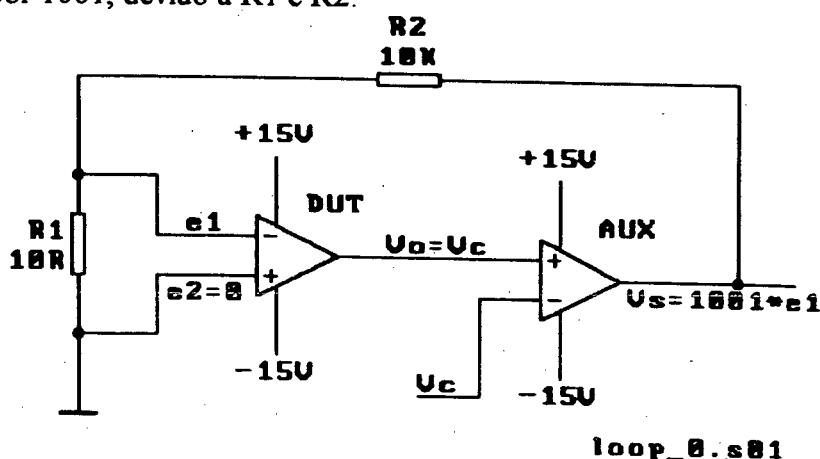


FIGURA 02. Versão básica do Laço de Medida

Quase todos os parâmetros são medidos através da variação do desvio de tensão (ΔV_{io}) que ocorre no DUT quando é variada alguma de suas condições. Como V_s é 1001 vezes essa tensão, é possível medir pequenos desvios de tensão, de +10mV a -10 mV, através da medida de V_s , de +10V a -10V.

Os passos para efetuar uma dada medida são:

- 1-Medir o V_{io} inicial do DUT.
- 2-Colocar o DUT nas condições definidas pelo procedimento de teste do parâmetro desejado.

3-Medir o V_{io} final, resultante.

4-Calcular ΔV_{io} , e em seguida, o parâmetro desejado.

Visto que os parâmetros são medidos com variações do Laço, o desvio do ampop auxiliar não precisa ser compensado, pois é automaticamente cancelado por ser um valor constante em todas as medidas.

Para exemplificar será detalhada a medida de A_d :

1-Inicialmente fazer $V_c=0V$ para forçar que a saída V_o do DUT também seja $0V$, conforme fig.3. Medir V_s e dividir por 1001 para obter V_{io1} , que é o próprio parâmetro V_{io} do DUT.

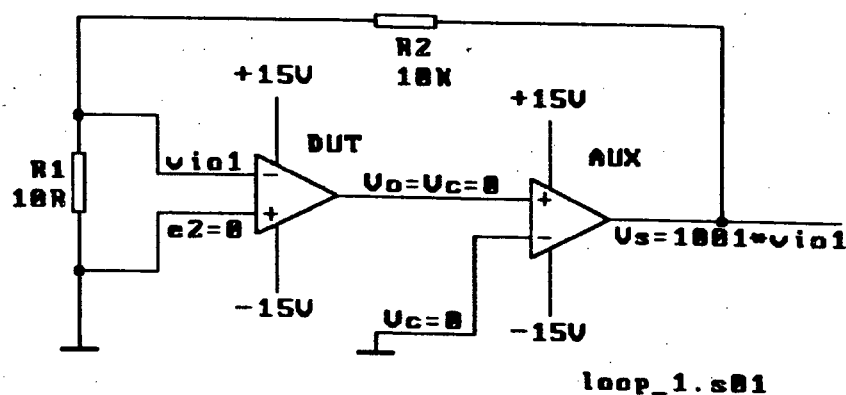


FIGURA 03. Laço básico, medida do parâmetro V_{io} .

2- Por definição, A_d é a razão entre a variação da tensão de saída pela variação da tensão diferencial de entrada correspondente, portanto, deve-se variar a tensão de saída do DUT, o que é feito através da mudança de V_c de 0 para 10V, conforme fig.4.

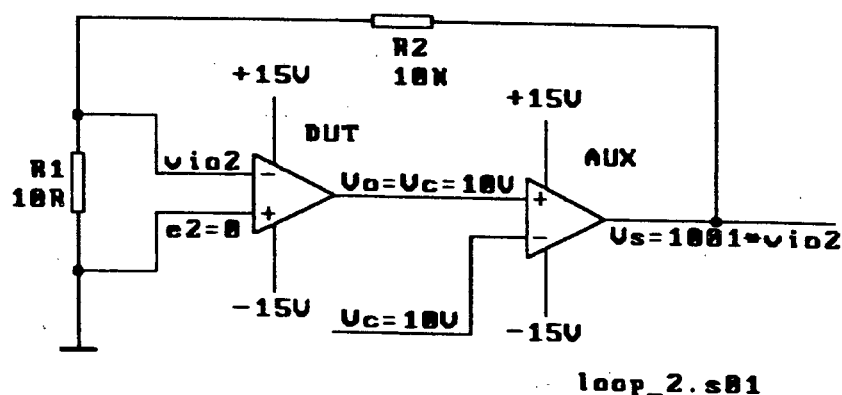


FIGURA 04. Laço básico, medida de A_d .

3-Medir o novo desvio V_{io2} , isto é, V_s dividido por 1001.

4-Com $\Delta V_{io}=V_{io2}-V_{io1}$, calcular A_d através da fórmula:

$A_d = \Delta V_o / \Delta V_{io} = 10V / \Delta V_{io}$, que é a própria definição de A_d .

1.3 Laço completo

O clássico Laço de medida de parâmetros de ampops, em sua versão mais completa [4,5], é apresentado na fig.5.

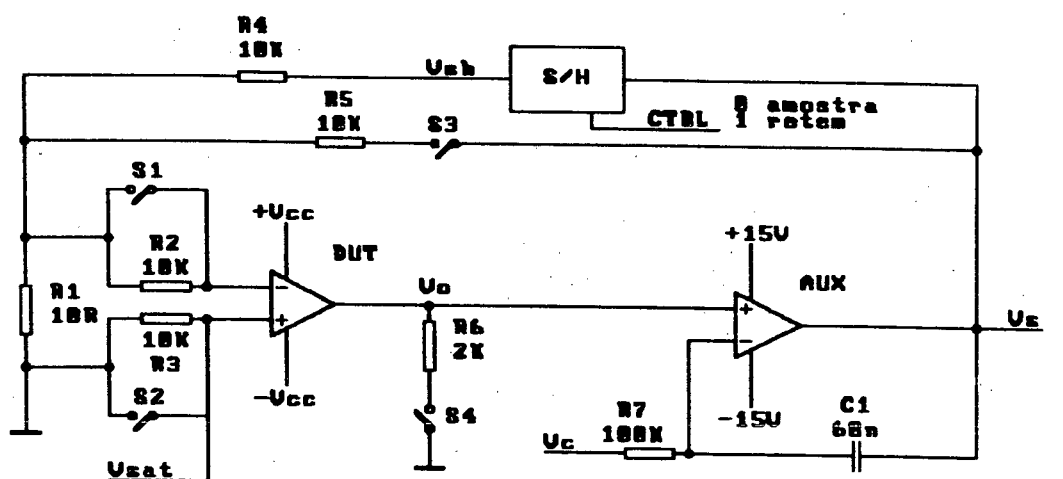


FIGURA 05. Laço completo

A seguir é dada breve explicação sobre cada componente acrescentado ao Laço:

Os resistores R2 e R3, com as chaves S1 e S2 em paralelo, permitem medir I_b e I_{io} , pois essas correntes, quando circulando por um ou dois desses resistores, provocam uma aparente mudança de V_{io} do DUT.

V_{sat} é uma tensão de entrada que provoca saturação positiva ou negativa no DUT, permitindo medir V_{op} .

S4 e R6 permitem testes com ou sem carga.

R7 e C1 dão estabilidade ao Laço de Medida.

O S/H permite anular o Vio do DUT.

1.4.2 Medida do parâmetro desvio de tensão V_{io}

Para medir esse parâmetro o circuito deve ser colocado no padrão inicial (fig.6b), conforme item 1.4.1. No padrão inicial, a saída do S/H tem 1001 vezes a tensão que cancela V_{io} do DUT, portanto medir V_{sh} e dividir por 1001: $V_{io} = \frac{V_{sh}}{1001}$

1.4.3 Medida da corrente de polarização I_b e de desvio I_{io}

Essa medida está ilustrada na fig.7, onde o circuito deve ser colocado no padrão inicial (fig.7a), conforme item 1.4.1. Em seguida, as chaves S1 e S2 devem ser abertas ou fechadas conforme tab.1 e fig.7b.

CHAVE ABERTA	CALCULAR:
S1	$I_{b-} = \frac{V_s}{1001 \cdot R_2}$
S2	$I_{b+} = \frac{V_s}{1001 \cdot R_3}$
S1 e S2	$I_{io} = \frac{V_s}{1001 \cdot R_g}$ Onde: $R_g = R_2 = R_3$

TABELA 1. Chave aberta e cálculo de I_{b+} , I_{b-} ou I_{io} .

Como exemplo, abrindo S1, a corrente de polarização da entrada inversora (I_{b-}) passa por R_2 , criando a tensão $R_2 \cdot I_{b-}$. Tal tensão aparece amplificada por 1001 em V_s , de forma que: $V_s = 1001 \cdot R_2 \cdot I_{b-}$.

Assim: $I_{b-} = \frac{V_s}{1001 \cdot R_2}$, como mostrado na tab.1.

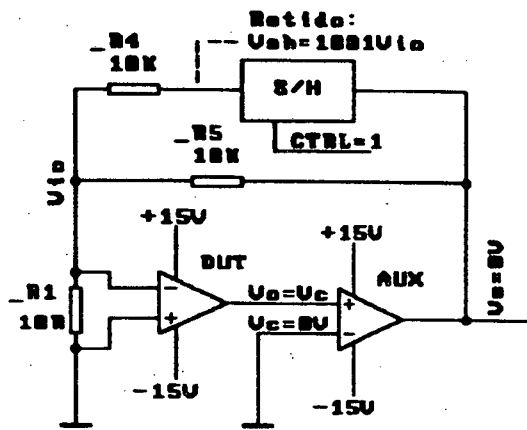


Fig. a (Padrao inicial)

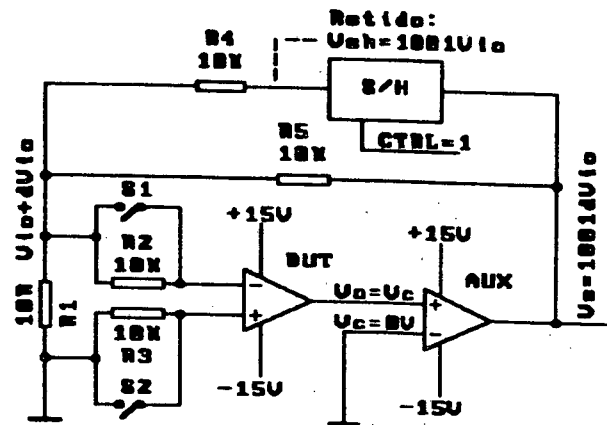


Fig. 6 (Medida de I_h e I_{10}) 1.801

FIGURA 07. Medida de Ib e Iio

Após medir I_{b+} e I_{b-} calcular I_b , conforme:
$$I_b = \frac{I_{b-} + I_{b+}}{2}$$

I₁₀ também pode ser obtida através da diferença entre I_b⁺ e I_b⁻, no entanto, isso é menos preciso que a medida direta.

1.4.4 Medida da Relação de Rejeição de modo Comum CMRR

Essa medida está ilustrada na fig.8, onde o circuito deve ser colocado no padrão inicial (fig.8a), conforme item 1.4.1. Em seguida, modificar a alimentação do DUT para $+V_{cc} = +25V$ e $-V_{cc} = -5V$ e fazer $V_c = +10V$, conforme a fig.8b. A modificação da alimentação pode ser conseguida com o deslocamento de $+10V$ do comum de $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$, através da ligação de $+10V$ a ele.

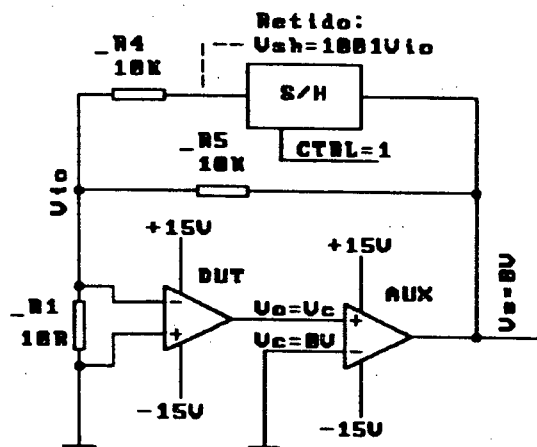


Fig.a (Padrao inicial)

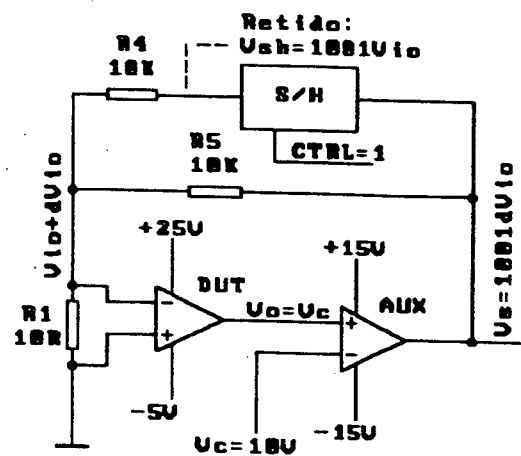


Fig. 6 CMRR. 201

FIGURA 08. Medida do CMRR.

Com essa alimentação, a referência interna do DUT passa a ser a média entre 25V e -5V, isto é, 10V.

A tensão V_o , controlada em 10V por V_c , continua sendo igual à referência interna do DUT. Como as entradas permanecem praticamente a 0V, do ponto de vista do DUT, elas estão deslocadas de $V_{cm}=V_c=-10V$, de modo comum. Tal deslocamento provoca uma variação em V_{io} do DUT, que deve ser medido através de V_s .

Dessa forma, pode ser calculado: $CMRR = \frac{V_c}{\Delta V_{io}}$

Essa fórmula foi deduzida das definições de CMRR, A_d e A_{cm} :

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}} = \frac{\frac{\Delta V_o}{\Delta V_{io}}}{\frac{\Delta V_o}{\Delta V_{cm}}} = \frac{\Delta V_{cm}}{\Delta V_{io}} = \frac{V_c}{\Delta V_{io}}$$

Para observar a linearidade do CMRR, é interessante, também, medi-lo para $+V_{cc}=+5V$, $-V_{cc}=-25V$ e $V_c=-10V$.

Para obter maior precisão do CMRR é possível medi-lo diretamente desde $(+V_{cc}=+5V, -V_{cc}=-25V, V_c=-10V)$ até $(+V_{cc}=+25V, -V_{cc}=-5V, V_c=+10V)$.

A medida AC do CMRR, em frequências abaixo de f_{cl} , é equivalente à medida DC descrita acima e preferida, pois diminui erros DC. Tal medida é efetuada ligando-se à V_c e ao comum de $\pm V_{cc}$ uma senoide de 20Vpp, o que varia V_{cm} de forma AC. Nesse caso, ΔV_{io} é calculada com a variação pico a pico de V_s .

1.4.5 Medida do ganho diferencial em malha aberta A_d

Essa medida está ilustrada na fig.9, onde o circuito deve ser colocado no padrão inicial (fig.9a), conforme item 1.4.1. Em seguida, fazer $V_c = +10V$, conforme fig.9b.

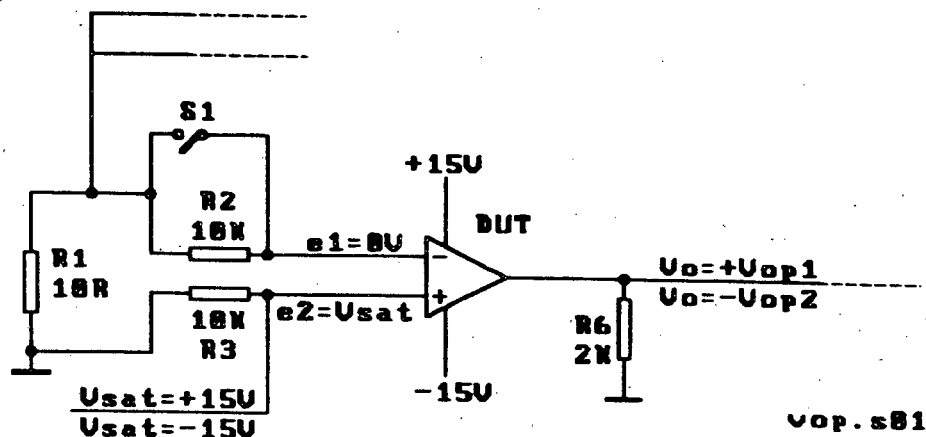


FIGURA 10. Medida de Vop

1.4.7 Teste de estado bom/ruim

Esse teste consiste em medir Vop e dar o conceito "bom" para os ampops onde $V_{op} \geq 10V$ e "ruim" para os ampops em que $V_{op} < 10V$.

1.5 Variações do Laço de Medida.

Quanto à compensação do Vio do DUT, o Laço possui as seguintes variações, listadas em ordem de aumento da precisão de medida:

- Laço sem compensação de Vio.
- Laço com SHS externo.
- Laço com S/H na realimentação.

Quanto à medida do CMRR, o Laço possui as seguintes variações, também listadas em ordem de aumento da precisão:

- Ligação do DUT como ADB.
- Deslocamento da alimentação do DUT.

Como já visto, esse trabalho utiliza o S/H na realimentação e mede o CMRR com deslocamento de alimentação.

1.5.1 Laço sem compensação de Vio. [1,2]

Nessa versão do Laço, fig. 11, o Vio do DUT não é cancelado, sempre havendo uma parcela em V_s devido a ele. Se Vio for 6mV, V_s será 6V, restando apenas 4V em V_s para variar com o parâmetro a medir, sendo esse o primeiro problema dessa versão. Se na medida de um parâmetro, V_s variar de 6V para 6,1V, os erros embutidos na medida de 6,0V e 6,1V podem mascarar a diferença de 0,1V que é o único valor de interesse na medida do parâmetro, sendo esse o segundo problema. O terceiro problema é que o Laço não pode ter ganho muito alto, por exemplo, se R_2 fosse 100K Ω , um Vio de 2mV saturaria V_s , pois o ganho seria dez mil.

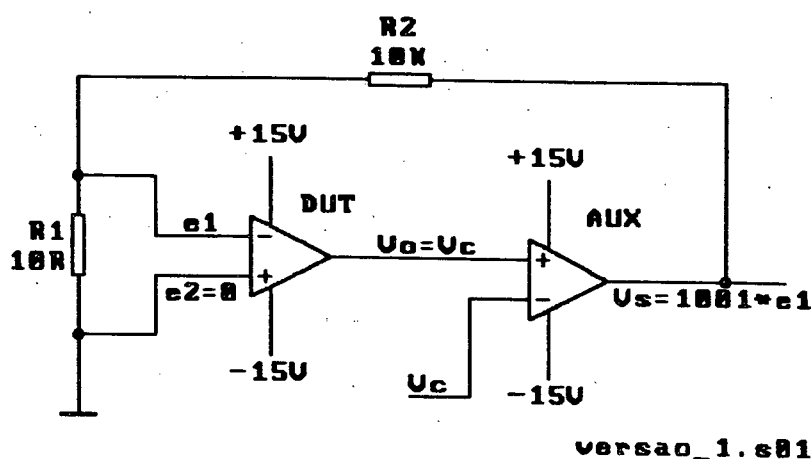


FIGURA 11. Versão do Laço sem compensação de Vio.

1.5.2 Laço com SHS externo. [3,8]

O SHS é formado pelo capacitor, chave e buffer com o objetivo de subtrair o Vio das medidas.

Essa versão, fig. 12, resolve o segundo problema do item 1.5.1, isto é, se CH1 estiver fechada e se houver 6,0V em V_s , o capacitor é carregado com $V_c=6,0V$. Quando a chave é aberta, a entrada do buffer passa a ter V_s-V_c , isto é 0V. Em seguida, se devido à medida de um parâmetro, V_c passa a ser 6,1V, só a diferença de 0,1 V aparece no buffer e pode ser amplificada antes de convertida por um A/D, o que resulta em menos erros.

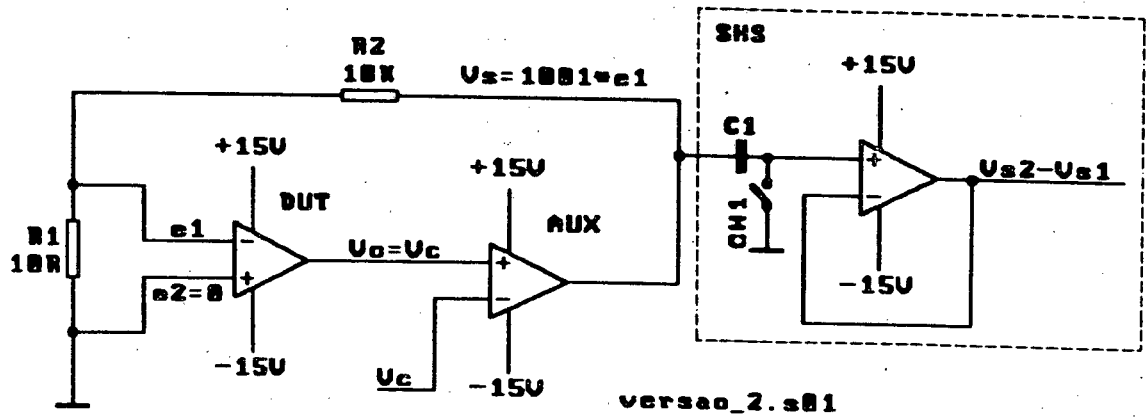


FIGURA 12. Versão do Laço com SHS

1.5.3 Laço com S/H na realimentação. [4]

Essa versão do Laço, fig 13, é a adotada nesse trabalho pois resolve os três problemas do item 1.5.1:

-Qualquer que seja o Vio, entre +10mV e -10mV, ele é cancelado pelo S/H, podendo haver variação em Vs, entre +10V e -10V, somente devido ao parâmetro em medida.

-Como Vs contém apenas variações do Vio, esse pode ser amplificado antes de convertido, caso seja pequeno.

-Com o Vio cancelado é possível ter ganhos maiores no próprio Laço, sem que haja saturação, e assim atingir ΔV_{io} bastante pequenos.

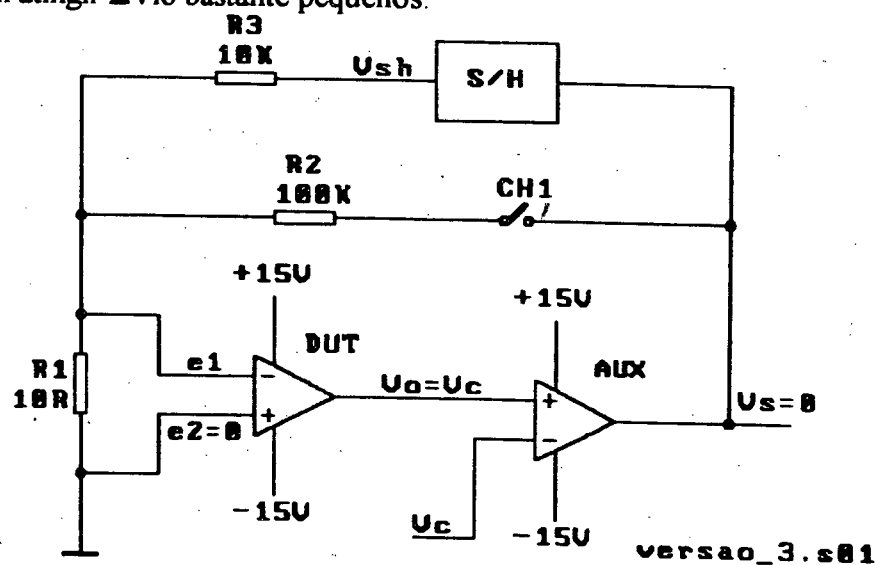


FIGURA 13. Versão do Laço com S/H na realimentação

1.5.4 Ligação do DUT como ADB. [2,11]

Essa variação de medida do CMRR, fig.14, pode ser empregada em qualquer versões do Laço. Como o DUT está na configuração ADB, com as duas entradas juntas e submetidas à tensão V_{cm} que varia, surge um ΔV_{io} no DUT para compensar a amplificação de modo comum de ΔV_{cm} . Dessa forma: $CMRR = \Delta V_{cm} / \Delta V_{io}$.

O problema com esse circuito é que os resistores precisam ser bem casados, caso contrário o CMRR medido será menor que o real, pois o descasamento dos resistores faz surgir uma tensão diferencial nas entradas do DUT.

Quando usando esse circuito, caso exista ajuste para casamento dos resistores, o ajuste pode ser realizado no sentido de minimizar ΔV_{io} , quando aplicando ΔV_{cm} . O ΔV_{io} mínimo é devido apenas ao CMRR do ampop.

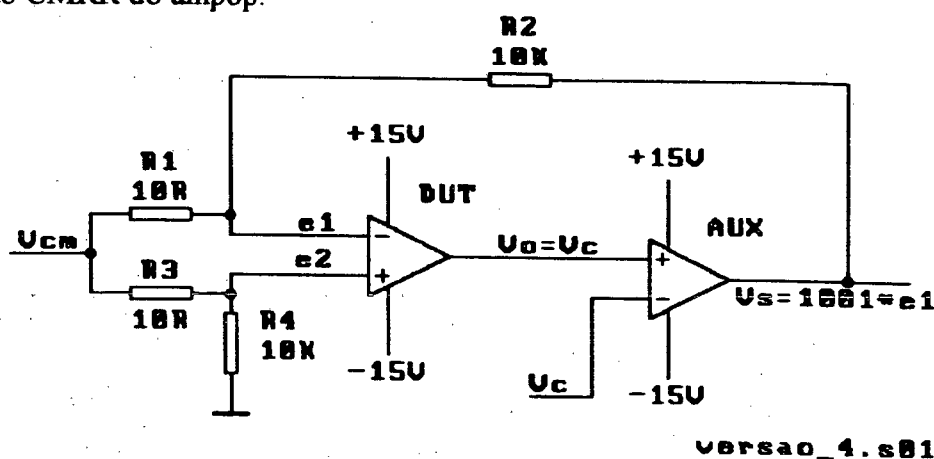


FIGURA 14. DUT ligado como ADB, para medida do CMRR.

1.5.5 Deslocamento da alimentação do DUT. [1,3,4]

Nessa variação, fig. 15 e explicado no item 1.4.4, como o procedimento de medida só utiliza deslocamento da alimentação, os resultados são precisos.

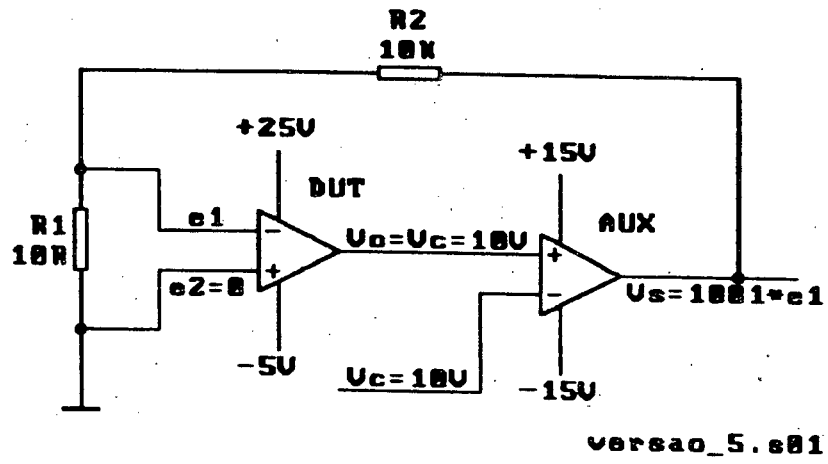


FIGURA 15. DUT com alimentação deslocada para medida do CMRR

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO E PROJETO DOS CIRCUITOS

Neste capítulo, será, inicialmente, descrito o sistema em diagramas de blocos e as faixas ideais de medida dos parâmetros de interesse. Em seguida serão apresentados os valores dos componentes do Laço de Medida e SAD e as faixas de medida implementadas. No final será detalhado os cálculos da compensação do Laço. O circuito completo do protótipo, da maneira como foi implementado, está no Apêndice 2.

2.1 Diagramas de blocos do sistema .

Conforme fig.16, o medidor de parâmetro de ampops desenvolvido é composto por quatro partes básicas:

1-Soquete. Fica acessível ao usuário, externamente ao PC, e está configurado para a disposição dos terminais do 741, o padrão mais comum. Foi utilizado um soquete com alavanca ("textool") que permite fácil conexão, sem esforço de inserção, do componente a testar ao circuito eletrônico.

2-Placa de expansão. Placa onde estão os circuitos de medição e de interface com o PC.

3-PC. É o microcomputador, com a placa de expansão em um "slot".

4-Software. Consiste no programa que controla a placa de expansão, realizando cada uma das medidas.

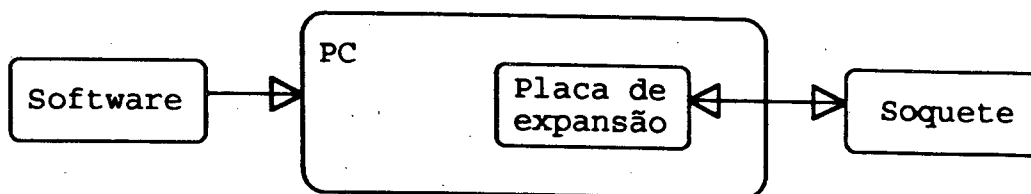


FIGURA 16. Diagrama de blocos do sistema .

A fig.17 mostra os componentes da placa de expansão:

1-Circuito analógico de medida. Consiste no Laço de Medida onde é inserido o DUT e diversos circuitos auxiliares.

2-Alimentação. São as fontes chaveadas que fornecem $\pm 15V$ a partir dos +5V do PC.

3-Sistema de aquisição de dados (SAD). É constituído por multiplexador analógico (AMUX), amplificador de ganho programável (AGP) e conversor A/D. Sua função é converter em digital as tensões dos diversos pontos do circuito analógico de medida, para que sejam calculados os parâmetro desejados.

4-Circuito de interface com o PC. Consiste no circuito digital que realiza operações de escrita ou leitura na placa de expansão. Em operações de escrita o PC configura o circuito analógico para realizar uma dada medida e em operações de leitura o PC obtém do SAD os valores das tensões relativas ao parâmetro medido.

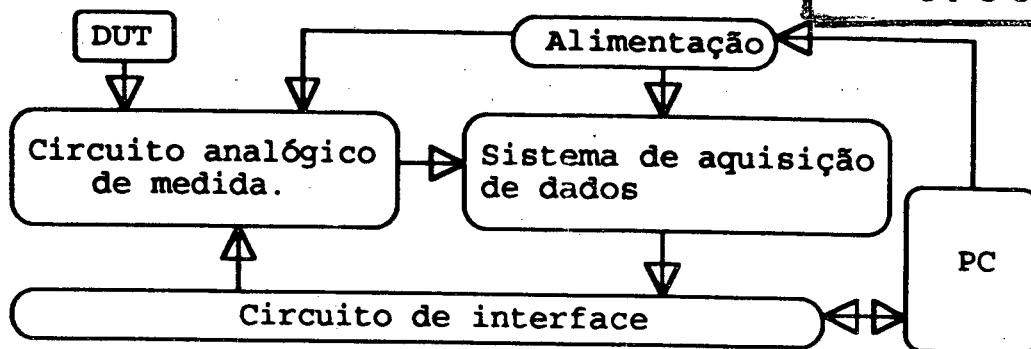


FIGURA 17. Placa de Expansão

2.2 Levantamento das faixas de medida dos parâmetros.

Para levantar as faixas ideais de medida foram selecionados ampops e valores dos parâmetros de interesse dos manuais [14,15,18,19]. Os ampops incluídos foram os de encapsulamento "dual in line", versão comercial "standard" e que suportam alimentação de $\pm 15V$ e carga de $2K\Omega$, já que esses são os ampops mais comuns em uso e essas são as condições de teste normalmente impostas. Na tab.2 tem-se as faixas ideais dos parâmetros do levantamento, junto com os parâmetros do 741 para comparação e as faixas implementadas no protótipo, conforme item 2.4.

*****	741	Levantamento (Ideal)	Implementado
Vio	6mV (max)	10uV a 25mV	10uV a 10mV
Ib	500nA (max)	10pA a 35uA	1nA a 1uA
Iio	200nA (max)	1pA a 7uA	1nA a 1uA
Ad	20K (min)	10^3 a $5 \cdot 10^6$	10^3 a 10^6
CMRR	70dB (min)	65dB a 120dB	60dB a 120dB
Vop	10V (min)	10V a 15V	0,2V a 20V

TABELA 2. Faixas de medida

2.3 Valores dos componentes do Laço e SAD

Cálculos iterativos, entre as faixa de medida de cada parâmetro (item 2.4) e os valores dos componentes do Laço e SAD, levaram ao circuito e valores de componentes apresentados nas fig.18 e 19.

Na fig.18 foi acrescentado ao Laço mais uma opção de resistor de realimentação, para ampliar as faixas de medida dos parâmetros. Assim, além do ganho 1.001, proporcionado pelos resistores de $10\text{K}\Omega$ e 10Ω , existe a opção pelo resistor de $100\text{K}\Omega$, que proporciona ganho 10.001 ao Laço.

Foi acrescentado mais um resistor em cada entrada do DUT para aumentar a faixa de medida de I_b e I_{io} e um divisor resistivo com dois resistores de $100\text{K}\Omega$ para permitir medir V_{op} que normalmente é maior que 10V.

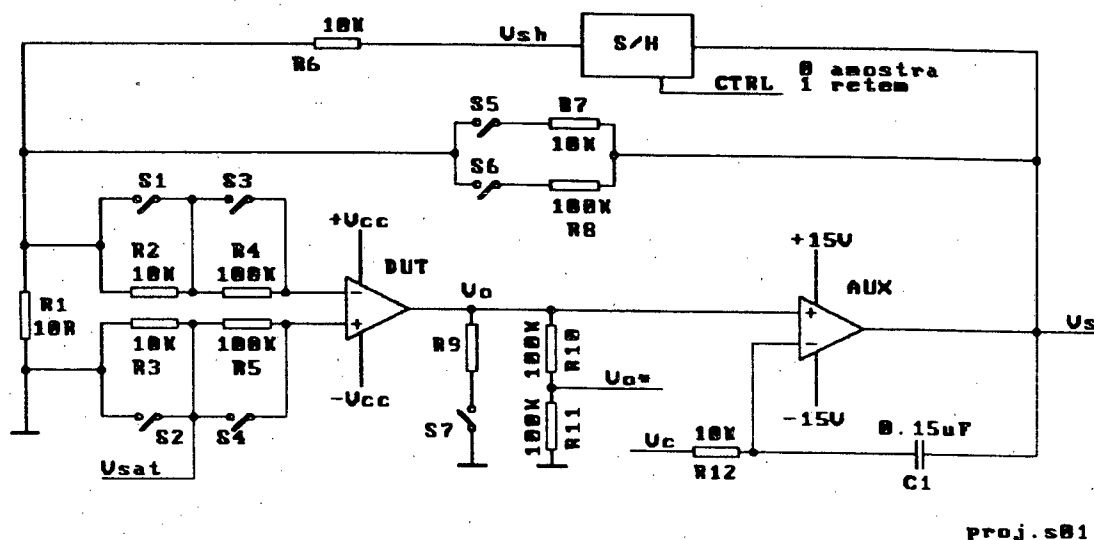


FIGURA 18. Laço para o cálculo das faixas de medida

Como todas as medidas de parâmetros consistem em mudar as condições do Laço e medir tensões, naturalmente é necessário um SAD. O SAD utilizado é mostrado de maneira simplificada na fig.19.

O A/D foi configurado para converter tensões de -10V a $+10\text{V}$ e, como é de 12 bits, existem $2^{12} = 4.096$ valores digitais para representarem as tensões nessa faixa. Assim dois

valores próximos diferem de $20V/4096 = 4,88mV$. Na conversão de 10V ocorre um erro de no máximo $4,88mV \cdot 100\% / 10V = 0,05\%$; no entanto, na conversão de tensões menores que 1V, o erro supera a 0,5%. Por esse motivo será considerado apenas conversões nas faixas de 1 a 10V e -1 a -10V, na entrada do A/D. Devido a existência do AGP no SAD, que pode ter ganho 1 ou 10, essas faixas correspondem a 0,1V a 10V e -0,1 a -10V na entrada do SAD, já que uma tensão de 0,1V amplificada por 10 resulta em 1V a ser convertido.

Foi utilizado um A/D de 12 bits pois um de 8 bits causaria 8% de erro, somente de erro de quantização, na leitura de 1V, prejudicando o desempenho de todo o sistema.

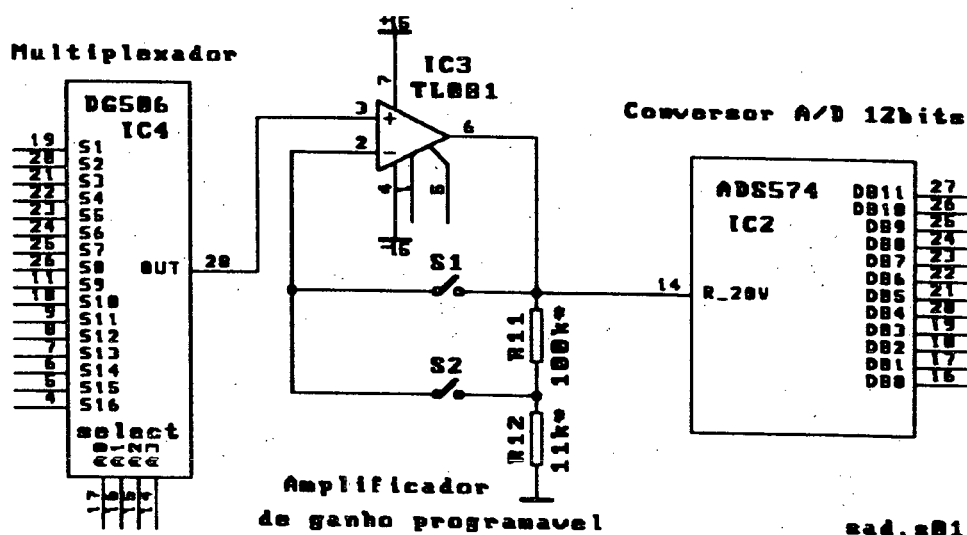


FIGURA 19. SAD para o cálculo das faixas de medida

2.4 Faixas de medida implementadas

Será provado que o Laço e SAD do item 2.3 foram projetados para atingirem as faixas implementadas, listadas na tab.2.

2.4.1 Faixa de Vio

A conversão de 10V, quando o ganho do AGP é 1 e o Laço tem ganho 1000, corresponde ao máximo Vio:
$$Vio(max) = \frac{10V}{1.1000} = 10mV$$

A conversão de 1V, quando o ganho do AGP é 10 e o Laço tem ganho 10.000, corresponde ao mínimo Vio:
$$\text{Vio}(\text{min}) = \frac{1\text{V}}{10 \cdot 10000} = 10\mu\text{V}$$

Assim, a faixa de medida de Vio é, em módulo, de 10 μ V a 10mV.

2.4.2 Faixas de Iio e Ib

Para a medida de Ib e Iio podem ser inseridos resistores de 10K Ω ou 100K Ω nas entradas do DUT e podem ser medidas ΔVio de 10 μ V a 10mV, assim:

$$\text{Iio}(\text{max}) = \text{Ib}(\text{max}) = \frac{10\text{mV}}{10\text{K}\Omega} = 1\mu\text{A}$$

$$\text{Iio}(\text{min}) = \text{Ib}(\text{min}) = \frac{10\mu\text{V}}{100\text{K}\Omega} = 100\text{pA}$$

Dessa forma a faixa de medida de Iio e Ib é, em módulo, de 100pA a 1 μ A.

Quanto maiores os resistores nas entradas do DUT, maior é a probabilidade de instabilidade do Laço de Medida devido ao ruído que surge de forma diferencial na entrada do DUT e portanto o software poderá estar habilitando somente os resistores de 10K Ω , piorando Ib(min) e Iio(min) para 1nA.

2.4.3 Faixas de Ad e CMRR

Para a medida de Ad e CMRR, a tensão de modo comum ou a saída do DUT é variada de 10V para que seja medida ΔVio de 10 μ V a 10mV, assim:

$$\text{Ad}(\text{max}) = \text{CMRR}(\text{max}) = \frac{10\text{V}}{10\mu\text{V}} = 10^6 = 120\text{dB}$$

$$\text{Ad}(\text{min}) = \text{CMRR}(\text{min}) = \frac{10\text{V}}{10\text{mV}} = 10^3 = 60\text{dB}$$

Dessa forma, a faixa de medida de Ad e CMRR é de 10³ a 10⁶.

2.4.4 Faixa de Vop

A faixa de medida do SAD vai, em módulo, de 0,1V a 10V, mas devido ao divisor resistivo, com dois resistores de 100KΩ ligados à saída Vo (fig.18), a faixa de medida de Vop vai de 0,2V a 20V.

2.5 Compensação do Laço.

O critério da estabilidade, aplicado ao Laço de Medida, estabelece que a diferença de queda entre G e 1/H deve ser menor que 40dB/dec, no ponto onde as duas curvas se interceptam, para que haja boa estabilidade (margem de fase maior que 45°, quando utilizando assíntotas). G é o parâmetro Ad do DUT vezes o do AUX, enquanto H é a realimentação do Laço, portanto 1/H é o ganho do Laço, 1.001 ou 10.001.

O Laço de Medida, do ponto de vista do estudo de estabilidade, se reduz à fig.20. Foi considerado $1/H = 10.001$ pois é o pior caso.

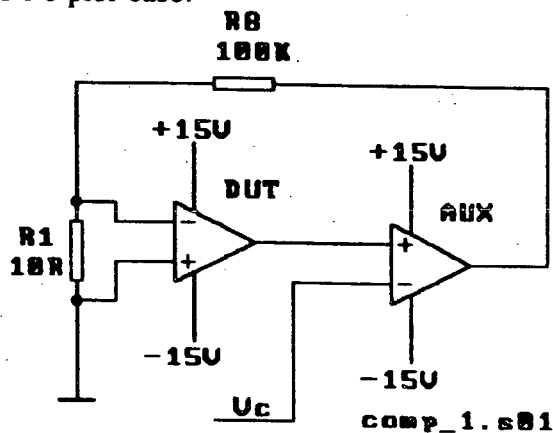


FIGURA 20. Laço, para o estudo da estabilidade.

O diagrama de Bode é mostrado na fig.21, onde o AUX e o DUT foram considerados tipo

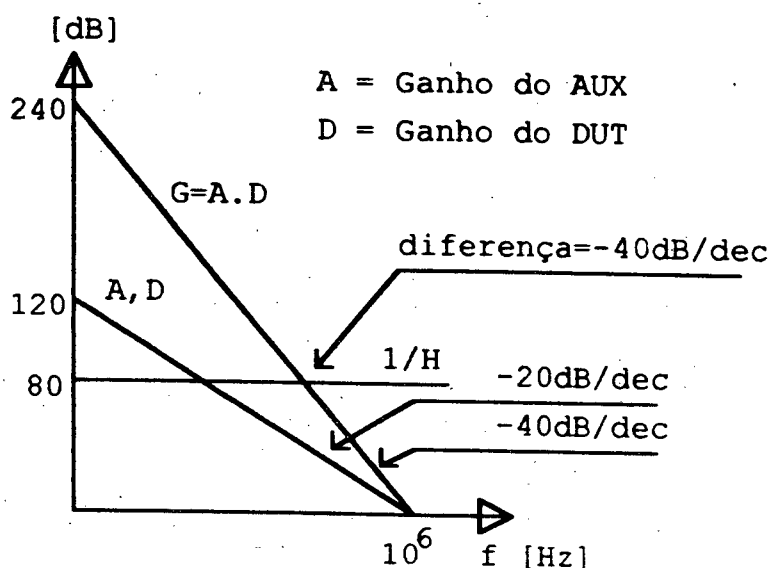


FIGURA 21. Diagrama de Bode do Laço não compensado

Como pode-se observar, o ponto de encontro entre $G = A \cdot D$ e $1/H$ tem diferença de queda de 40 dB/dec . Considerando o modelo de dois pólos do ampop, se esse ponto estiver mais próximo do primeiro polo (em décadas) o sistema é estável com péssima margem de fase e se o ponto estiver mais próximo do segundo polo, o sistema é instável.

A compensação proposta [5], através de R e C , é mostrada na fig.22.

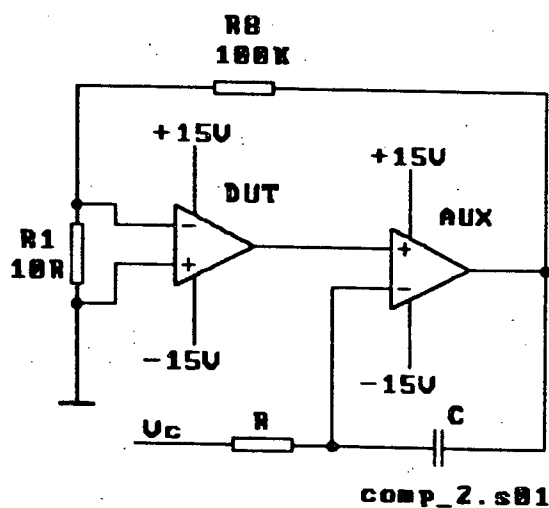


FIGURA 22. Laço compensado

Para proceder a essa compensação, seguir os seguintes passos, ilustrados na fig.23:

-Desenhar a curva de A_d do DUT, aqui suposto 741.

-Desenhar o maior $1/H$, isto é, 10.000. A intersecção é o ponto crítico. Nesse caso $F_{crit} = 100\text{Hz}$.

-Calcular: $F_1 = F_{crit}/4$. Assim: $F_1 = 25\text{Hz}$.

-Selecionar R e C de forma que $F_1 = 1/(2\pi RC)$. Portanto, adotando $R = 100\text{K}\Omega$, resulta em $C = 0,064\mu\text{F}$, ou aproximadamente 68nF .

Dessa forma, após a compensação, no ponto onde as curvas G e $1/H$ se interceptam, a diferença de queda é de 20dB/dec e a margem de fase é muito boa.

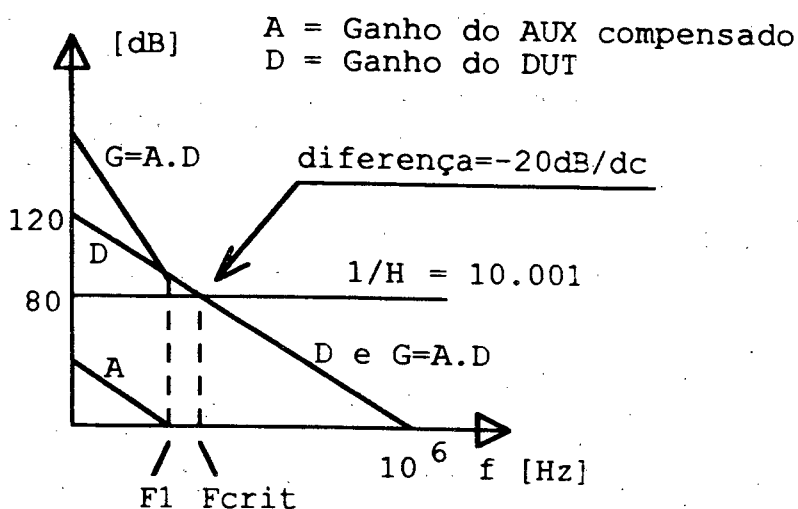


FIGURA 23. Diagrama de Bode do Laço compensado

O preço dessa compensação é que, após mudar qualquer condição do Laço, será necessário esperar $5RC$ até que o Laço estabilize.

O ampop auxiliar, utilizado na compensação acima, foi suposto compensado e possuidor de um PGB de 1MHz , no entanto isso não é necessário, visto que, após a compensação, sua função de transferência passa a ser a mostrada na fig.23, independente do PGB e da compensação interna. Dessa forma o ampop auxiliar não influi na estabilidade do laço compensado, apenas o DUT.

CAPÍTULO 3

SOFTWARE DO MEDIDOR

Neste capítulo será apresentado como foi desenvolvido o software, algumas alterações feitas na metodologia de medida, e o fluxograma das rotinas principais, cuja listagem completa está no Apêndice 4.

3.1 Desenvolvimento do Software

O software foi escrito em Linguagem C, utilizando o Compilador Borland C++, versão 2.0. O desenvolvimento foi iniciado com a criação das rotinas que possibilitam abrir e fechar uma única chave separadamente das outras (ex.: `fecha(17)`). Com essas funções foram criadas outras funções mais amigáveis (ex.: `liga_carga()`). Depois foram desenvolvidas rotinas de programação do SAD. Finalmente, utilizando as funções descritas acima, as funções de teste e medida de cada parâmetro puderam ser criadas, juntas com um menu bastante simples. Também foi desenvolvida um conjunto de rotinas que durante o desenvolvimento do sistema foram bastante úteis para ajustar e testar os circuitos e comprovar os métodos de medida. O procedimento de ajuste dos circuitos foram descritos no Apêndice 3.

3.2 Ajuste da metodologia

Foram efetuadas algumas alterações nos procedimentos de medida implementados no software, em relação aos explicados no cap.1, com o objetivo de diminuir erros:

- Para cancelar os erros do S/H (Veja fig.5) o software mede V_{sh} e V_s para compor V_{io} em cada condição do Laço, assim o ΔV_{io} calculado em duas condições do Laço não sofre de erros devido à variação de V_{sh} , o que ocorreria se ΔV_{io} fosse considerado como sendo simplesmente V_s .

- Cada parâmetro é medido através de ΔV_{io} que surge no DUT quando é variado alguma condição do Laço. O ΔV_{io} é calculado com V_{io1} , correspondente à condição inicial, e V_{io2} ,

correspondente à condição final do Laço. Vio1 e Vio2, por serem medidos em instantes diferentes, causam erro de medida. Para eliminar esse erro, é medido duas vezes Vio na condição inicial, Vio1' e Vio1'', na seguinte sequência: Vio1', Vio2, Vio1''. Dessa forma, a média $Vio1 = (Vio1' + Vio1'')/2$ parece uma medida feita no mesmo instante que Vio2.

3.3 Fluxogramas

Serão apresentados os seguintes fluxogramas:

-Rotina principal: main()

-Rotina de teste bom/ruim: teste()

-Rotina de medida dos parâmetros de ampops: param()

Os fluxogramas das demais rotinas não serão apresentados pois as próprias rotinas em C (Apêndice 4), são mais claras.

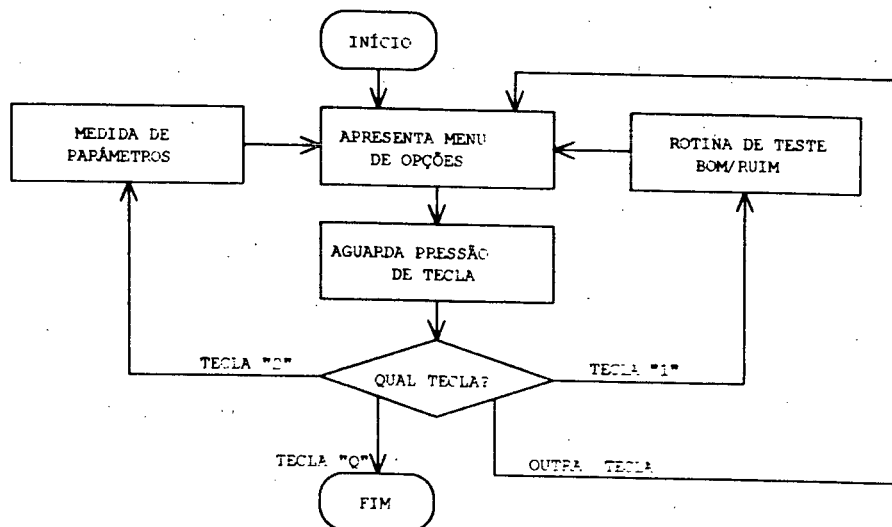


FIGURA 24. Fluxograma da rotina principal

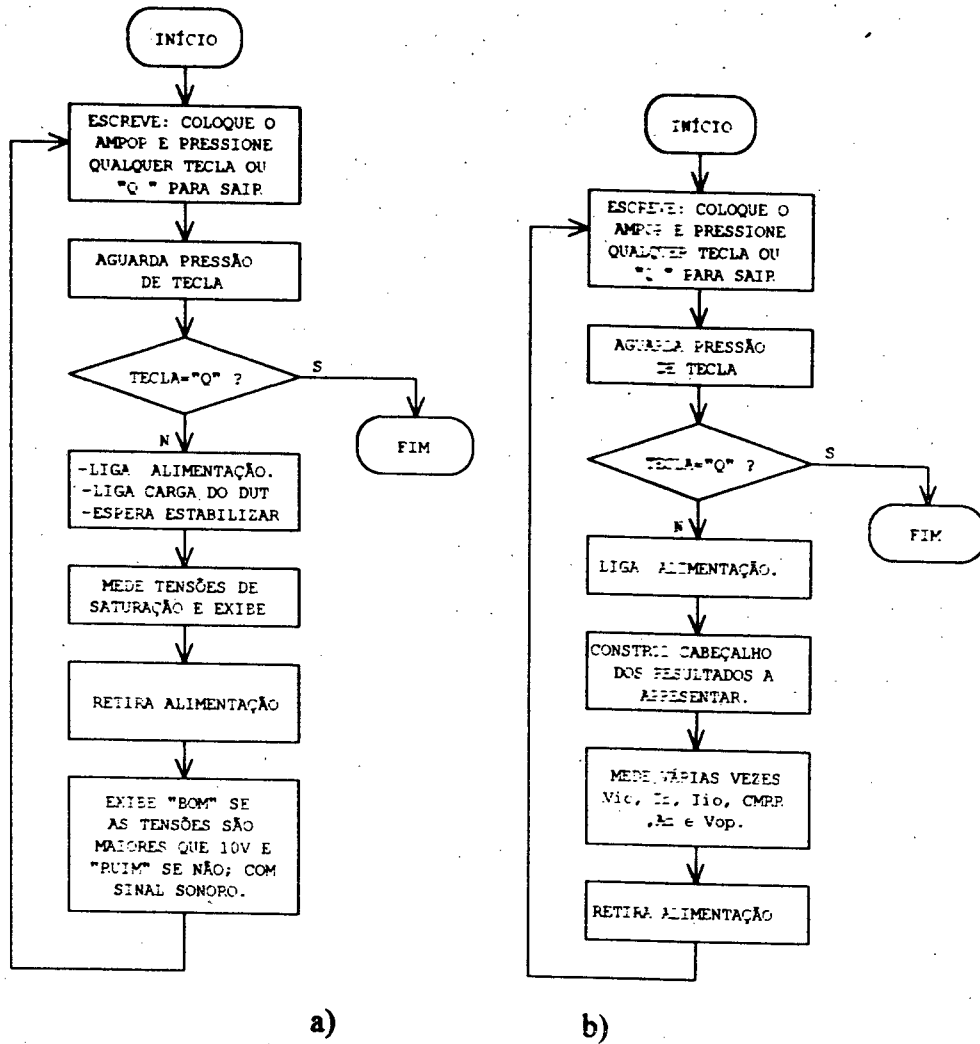


FIGURA 25. Fluxog.: a)Teste b)Medida de parâmetros

CAPÍTULO 4

RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de medidas realizadas em alguns ampops. No Apêndice 6 vários ampops tiveram seus parâmetros listados. Também serão feitas conclusões finais e dadas sugestões para implementações futuras.

4.1 Resultados

A faixa de medida e erro de cada parâmetro de interesse estão na tab.3, para possibilitar comparações. As faixas foram calculadas no item 2.4 e os erros no Apêndice 5.

Parâm.	Vio	Ib	Iio	Ad	CMRR	Vop
Faixas	10uV	1nA	1nA	10 ³	10 ³	0,2V
	a	a	a	a	a	a
	10mV	1uA	1uA	10 ⁶	10 ⁶	20V
Erro	±3,2%	±3,9%	±3,9% ±1,5%Ib	±6%	±6%	±3,6%

TABELA 3. Faixas e erros de medida do protótipo

Para exemplificar os resultados obtidos nas medidas efetuadas pelo protótipo, nas tab.4 e 5 foram listados os parâmetros medidos de dois ampops (Mais exemplos no Apêndice 6).

Na primeira linha das tabelas foram apresentados os valores típicos e máximos ou mínimos fornecidos pelo fabricante [19]. Na segunda linha estão listados os valores dos parâmetros medidos manualmente com a opção "Teste do Instrumento" do software, usando multímetro e osciloscópio para conferir as condições do DUT e realizar as medidas e calculadora para calcular os parâmetros. Tais valores permitem comparação com as duas últimas linhas, onde estão a média e dispersão das medidas efetuadas automaticamente pelo sistema, com 10 leituras.

As médias e dispersões foram calculadas utilizando as seguintes equações:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad s = \frac{1}{n-1} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad d = \pm 3 \cdot \sigma = \pm t \cdot S \quad d\% = \frac{d \cdot 100\%}{\bar{x}} \quad \text{Onde:}$$

x_i = leitura efetuada ($i=1$ até n) sendo n = número de leituras.

\bar{x} = média das leituras.

S = Desvio padrão para um número finito de leituras.

d = dispersão, onde 99,7% dos erros aleatórios provavelmente estão incluídos.

σ = Desvio padrão para um número infinito de leituras.

t = coeficiente de correção de S . Para 10 leituras: $t=4,3$. Para infinitas leituras: $t=3$.

$d\%$ = Dispersão percentual, em relação à média das leituras.

$\mu A741$	Vio [mV]	Ib [nA]	Iio [nA]	Ad [10^3]	CMRR	Vop [V]
Fabric.	1(typ)	80(typ)	20(typ)	200(typ)	90dB(typ)	13(typ)
25°C [19]	6(max)	500(max)	200(max)	20(min)	70dB(min)	10(min)
Manual	1,1	67	6,5	280	88dB	12,3
Média	1,135	67,0	5,4	302,8	88,1dB	12,3
Dispers.	0,3%	2,9%	28,7%	2,8%	1,3%	0,1%

TABELA 4. Parâmetros de um $\mu A741$ medidos pelo protótipo.

TL081	Vio [mV]	Ib [nA]	Iio [nA]	Ad [10^3]	CMRR	Vop [V]
Fabric.	3(typ)	30pA(typ)	5pA(typ)	200(typ)	86dB(typ)	12
25°C [19]	15(max)	400pA(max)	200pA(max)	25(min)	70dB(min)	10
Manual	-5,9	muito pequena	muito pequena	357	89,2dB	12,0
Média	-5,948	2,2	1,2	353,0	89,4dB	12,0
Dispers.	0,0%	55,7%	89,3%	2,6%	1,9%	0,1%

TABELA 5. Parâmetros de um TL081 medidos pelo protótipo

Para que o DUT atinja o equilíbrio térmico, é feita uma medida de V_{io} por segundo, durante 20s. Isso é apresentado na tab.6 para que seja verificado o processo de aquecimento. Da mesma forma que os valores dos parâmetros variam com o aquecimento, os ampops apresentam valores diferentes de parâmetros para temperaturas ambientes diferentes.

Vio	0s	5s	10s	15s	20s
LM741	0,208	0,243	0,248	0,250	0,251
TL081	0,030	0,072	0,077	0,077	0,079

TABELA 6. Efeitos da temperatura sobre as medidas.

4.2 Discussões e conclusões.

As dispersões das medidas de A_d e CMRR (tab.4 e 5) são, provavelmente, em grande parte devidos aos detectores de pico, que causam erros aleatórios de $\pm 2\%$. V_{op} é a medida mais fácil pois só varia de 10V a 15V e não utiliza o Laço de Medida, portanto, a dispersão é praticamente zero. As leituras de I_{io} e I_b do TL081 e I_{io} do $\mu A741$, próximas do limite inferior de 1nA, apresentam dispersões elevadas, provavelmente devido à utilização de resistores nas entradas do DUT, no procedimento de medida e devido aos conversores DC/DC de péssima regulação. Também pode-se observar que há um erro sistemático de alguns nA, já que o TL081 possui no máximo $I_b=0,4nA$ e $I_{io}=0,2nA$. As dispersões das medidas de cada parâmetro ficaram, quase sempre, dentro do esperado, principalmente quando alimenta-se o protótipo com fontes externas bem reguladas e simétricas. Em geral, as dispersões são, provavelmente, provocadas por derivas dos componentes do sistema e principalmente do próprio DUT, ruído, detectores de pico (medida de A_d e CMRR), erro de quantização do A/D ou características de estabilidade do Laço de Medida, determinadas pelas características de cada DUT no soquete, "layout" do circuito, qualidade da alimentação, compensação feita, resistores nas entradas do DUT (medida de I_{io} e I_b), etc.

Como o processamento dos resultados indicam um bom funcionamento geral do sistema, pode-se concluir que, apesar do protótipo ter sido implementado com simplicidade, foi possível medir os parâmetros DC mais importantes dos ampops. Unindo isto ao baixo custo conseguido, em torno de US\$500,00 em componentes, e ao aproveitamento de um PC, chegou-se a um sistema viável e de grande utilidade. O próximo passo do trabalho é medir os parâmetros AC, como o "slew rate" e o Produto Ganho Banda, configurar automaticamente o soquete e construir um protótipo em placa de circuito impresso apropriada, que realmente fique alojado no interior do PC, para testar o protótipo em condições reais.

4.3 Sugestões

A alimentação do circuito analógico e do DUT foram obtidas dos 5V do PC, através do regulador chaveado 5C15D, que apresenta $\pm 15V$ isolados na saída, mas com péssimas regulação de carga e linha, o que prejudica a estabilidade do laço de medida e a precisão do funcionamento do SAD e todos os circuitos analógicos restantes. Seria interessante utilizar o 5C18D para conseguir $\pm 18V$ e utilizar reguladores simétricos lineares para obter $\pm 15V$, de ótima qualidade. Uma solução econômica é usar a fonte de $\pm 12V$ do PC para todo o circuito analógico, exceto o DUT, que continua alimentado por $\pm 15V$, proveniente de 4 baterias de 9V e reguladores, já que seu consumo é normalmente pequeno e permanece pouco tempo ligado.

Para medir o PSRR, após o regulador de $\pm 15V$, utilizar outro de $\pm 5V$ com um relê de 2 canais para curto-circuitar as entradas com as saídas e assim conseguir $\pm 15V$ ou $\pm 5V$ de alimentação para o DUT, conforme fig. 26a. Com ΔV_{io} dessas duas condições, é possível calcular o PSRR [3].

No protótipo os detectores de pico para a medida de A_d e CMRR causam 5% de erro, assim devem ser otimizados. Eles também podem ser feitos por software, lendo V_s durante um ciclo, ajustando uma senoide nos pontos e calculando a amplitude pico a pico. Foi tentado utilizar a simples diferença entre o maior e menor valor de V_s , lidos num ciclo, porém isso mostrou conter mais erro que o detector por hardware. Uma vez melhorada a medida de A_d será possível tentar medir R_i e R_o :

-Medida de R_i [10]: Pode ser calculado através da diminuição de A_d que ocorre quando é inserido resistores nas entradas do DUT.

-Medida de R_o [10]: Pode ser calculado através da diminuição de A_d que ocorre quando é inserido carga no DUT, no entanto, a colocação de carga pode aquecer o DUT e comprometer a medida. A_d deve, portanto, ser medido o mais rápido possível utilizando, por exemplo, 1KHz.

Foram testadas as medidas de R_i e R_o , mas a dispersão das medidas de A_d não permitem obter valores confiáveis. Devem ser realizadas diversas medidas de A_d nas duas condições de medida de R_i e R_o , para serem utilizadas as médias, que possuem menos erros aleatórios.

A medida de A_d a 1KHz pode ser conseguida chaveando resistores de ajuste de frequência do gerador senoidal e modificando a compensação do Laço, conforme fig.28, onde os valores dos componentes da compensação devem ser escolhidos utilizando o diagrama de Bode.

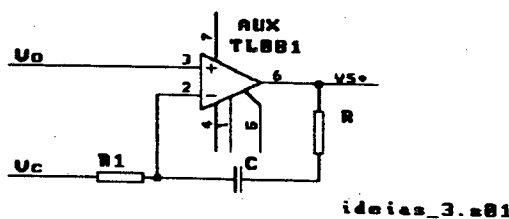


FIGURA 28. Compensação para medida de A_d a 1KHz.

A_d a 1KHz vezes 1KHz resulta no PGB. Com A_d a 1KHz e 2,5Hz pode-se calcular F_{cl} e A_d realmente DC. Também é interessante medir A_d a mais uma frequência para confirmar se o ampop é compensado.

Muitos ampops têm dois terminais de ajuste de desvio, onde devem ser ligados os dois extremos de um "trimpot", cuja terminal central vai ligado a $-V_{cc}$. Para medir o máximo ajuste possível [1], deve ser ligado um resistor entre os dois pinos e, separadamente, ligar cada um dos

terminais a $-V_{cc}$, através de chaves analógicas. Para essa medida, o ganho do Laço deve ser reduzido pois o desvio resultante é grande. O desvio inicial do ampop deve ser deduzido.

Para medir o consumo do DUT, colocar um resistor entre $+V_{cc}$ e seu pino de alimentação e medir a queda de tensão sobre o resistor, com um ADB. Em outras medidas, esse resistor deve ser traspassado com um relê para não causar erro na alimentação do DUT. A corrente de curto-circuito é medida da mesma forma, mas fazendo $V_c=10V$ e ligando a saída do DUT com o terra, através de um relê.

A função de transferência do DUT pode ser levantada apenas modificando o software do protótipo. O tempo esperado, enquanto os capacitores detectores de pico carregam, pode ser substituído por várias medidas de V_s e V_c , assim, os pontos (V_s, V_c) correspondem à função de transferência. O mesmo pode ser feito para o CMRR e em várias frequências.

A configuração de um soquete de 16 pinos, conforme a função de cada pino do DUT, pode ser feita por 5 AMUX 16 para 1, sendo um para cada pino do DUT: $+V_{cc}$, $-V_{cc}$, ent.inv., ent.n.inv. e saída. Um sexto AMUX pode ser utilizado para monitorar a tensão em qualquer dos 16 pinos do soquete e mais dois podem servir para ligar um capacitor de compensação de frequência, caso necessário. Os problemas quanto à configuração automática é que os AMUX da alimentação devem ter baixa resistência, os AMUX das duas entradas podem causar instabilidade no Laço e o AMUX da saída prejudica a medida de R_o , caso ela seja implementada.

O ajuste do desvio e ganho do SAD (A/D e AGP) poderiam ser completamente automatizados por software. Para isso bastaria ligar o terra analógico e uma fonte de referência a dois canais do AMUX. O software faria as seguintes leituras:

- 1-Leitura do terra, com ganho 1 no AGP.
- 2-Leitura do terra, com ganho 10 no AGP.
- 3-Leitura da tensão de referência, com ganho 1 no AGP.

Com as leituras 1 e 2 seria possível calcular o desvio do AGP e do A/D (duas incógnitas com duas equações) e com a leitura 3 e os desvios calculados seria possível calcular o ganho do A/D. Essas leituras poderiam ser feitas antes de cada medida e os valores calculados poderiam ficar armazenados em variáveis, utilizadas para corrigir cada medida efetuada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] LEWIS, D. "Testing Operational Amplifiers", *Electronic Test*, p.76-82, Jan.1979
- [02] SHOEMAKER, W.E. "Operational Amplifiers Nonlinearities", *Instruments and Control Systems*, p.87-88, Fev.1972
- [03] WOJSLAW, C. F. "Use Op.Amp. with greater confidence", *Electronic Design*, n° 6, p.140-143, Mar.16, 1972
- [04] MILER, G. G. "Test Procedures for Operational Amplifiers", *Linear and Data Acquisition Products*, Harris Semiconductor, AN-508, 1978.
- [05] LEWIS, D. "Compensation of Linear IC Test loops", *Electronic Test*, p.82-86, May 1979
- [06] RIGBY, A. "Placa de protótipos para o IBM PC", *Elektor Electrónica*, p.60-62, Set.1992
- [07] ROY, S. C. D. "Digitally Programmable Gain Amplifier", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.IM-33, n° 4, p329-332, Dez. 1984.
- [08] MILLMAN, J.; GRABEL, A. "Microelectronics", McGraw Hill, p.631-635, 1987.
- [09] TOBEY; GRAEME; HUELSMAN "Operational Amplifiers - Design and Applications", Burr Brown, 1971.
- [10] MILLMAN; HALKIAS "Eletrônica - Dispositivos e Circuitos", vol.2, p.580-583, 1981
- [11] BYERS, T. J. "Testing Semiconductors VI - Op-amp characteristics and how measure them", *Radio-Electron(USA)*, vol.58, n° 9, p.61-3, set.1987
- [12] EGGEBRECHT, L. C. "Interfacing to the IBM Personal Computer", 1ªEd, p.154-155, 1989.
- [13] STEIN, E. "Medidor de parâmetros de amplificadores operacionais.", UFSC, 1982
- [14] BURR-BROWN "Integrated circuits data book", vol.33, 1989.
- [15] ANALOG DEVICES "Integrated circuits", 1984.
- [16] RCA-INTERSIL "Component Data Catalog", 1988.
- [17] NATIONAL SEMICONDUCTORS, "Special Functions Databook", 1979.
- [18] NATIONAL SEMICONDUCTORS, "Linear Databook", 1980.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS, "Linear Circuits Data Book", vol.1, 1989.

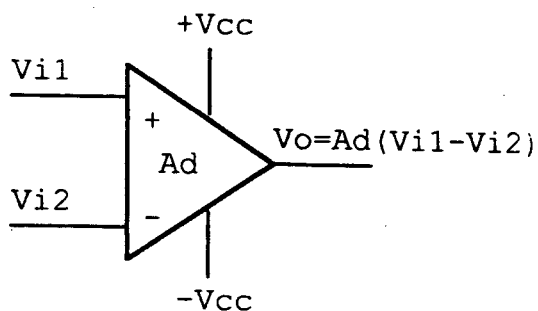
- [20] ELEKTOR ELECTRÓNICA "Analizador de semicondutores para PC", vol.84, p.49-55, Dez.1991
- [21] YAMATAKE, M. "Caracterización de amplificadores operacionales", Revista Española de Electrónica, p.56-62, Dez.1989
- [22] GOODENOUGH, F. "Operational Amplifier Parameter definition and measurement guide", Teledyne Philbrick - Bulletin AN-23, June 1976.
- [23] BYERS, T. J. "Testing Semiconductors VII - This time we examine the AC characteristics of the op-amp", Radio-Electron(USA), vol.58, n° 11, p.115-117 e 130, nov.1987
- [24] JARAMILLO, N. "Medicion Automatica de las Caracteristicas del Amplificador Operacional 741", V Congreso Latinoamericano de control automatico - Informatica 92 - AUT 027 - p.106-111, 1992.
- [25] HARVEY, B. "Simple circuits provide accurate ac testing of op amps", Elantec, EDN, vol.32, n° 10, p.175-180 e 182, 14-May-1987.
- [26] IKEDA; TAKATSUKA; YAMAMOTO "A Fully Automatic Measuring Device for Frequency Characteristics of Operational Amplifiers", IEEE Trans. on Inst. and Meas., vol.IM-31, n° 1, p.37-40, mar.1982
- [27] ELECTRONICS & WIRELESS WORLD "Settling Time Measurements", vol.92, n° 1610, p.34-35, dez.1986.
- [28] ABE, K.; WAKATSUKI, Y.; NARAOKA, M. "Automatic Measurement of Frequency Characteristics of Operational Amplifier Circuits", IEEE Transaction on Education, vol.32, n° 3, p.367-370, Ago.1989.
- [29] GRAEME, J. G. "Check op-amp open-loop dc gain in one cycle of the test signal", Electronic Design, n° 7, p.60, Abril 1971.
- [30] CLAYTON, C. B. "Measurement of input bias currents and offset voltage", Wireless World, p.324, July 1972.
- [31] YAMATAKE, M. "A simplified test set for Operational Amplifier Characterization", National Semiconductors AN-24, June 1969.
- [32] WIRELESS WORLD "Measurement of the open loop transfer curve", p.273, June 1972.

- [33] SANSSEN, W. M. C.; STEYAERT, M.; VANDELOO, P. J. V. "Measurement of Operational Amplifiers Characteristics in the Frequency Domain", IEEE Trans. on Inst. and Meas., vol.IM-34, n° 1, p.59-65, mar.1985.
- [34] CHUANG, C. T. "Analysis of the Settling Behavior of an Operational Amplifier", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.SC-17, n° 1, p.74-80, Fev 1982.
- [35] PERTENCE JÚNIOR, A. "Amplificadores operacionais e filtros ativos", McGraw-Hill, p.257-297, 4ª edição, 1988.

APÊNDICE 1

O AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O ampop é um circuito integrado de grande emprego em Sistemas de controle, Instrumentação, Eletromedicina, Processamento e geração de sinais, etc, por ser um componente eletrônico versátil, pequeno, confiável, fácil de manusear e barato. Do ponto de vista funcional, apresenta duas entradas e uma saída. Idealmente, as resistências das entradas são infinitas e seu funcionamento consiste em apresentar, na saída, a diferença de tensão das entradas, amplificada pelo enorme ganho diferencial (A_d), idealmente infinito. Tal comportamento é explicado pelo sua construção interna, geralmente um amplificador diferencial na entrada, um estágio seguidor de emissor na saída e amplificadores intermediários, para aumentar A_d . Seu símbolo e funcionamento ideal são apresentados na fig.29, onde a entrada com o sinal "+", é chamada não inversora e a entrada com "-" é a inversora, pois sua tensão aparece com sinal negativo na equação da tensão de saída. As alimentações $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$ opcionalmente podem não aparecerem no símbolo, sendo consideradas $+15V$ e $-15V$, que é padrão. Esse componente, em geral, não necessita de GND (0V), mas internamente usa a média da alimentação, $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$, como referência. A maioria das aplicações são obtidas com a ligação de uma rede de realimentação externa no ampop, de forma a fixar o ganho ou função de transferência desejada.



Idealmente:

Resistência de entrada R_i = infinito
Ganho A_d = infinito

FIGURA 29. Símbolo e funcionamento ideal do ampop.

Devido a suas não idealidades, o ampop apresenta diversos parâmetros dos quais será definido os mais importantes:

-Desvio de tensão de entrada (V_{io}): Tensão DC que precisa ser aplicada entre as entradas para que a tensão de saída seja levada a zero.

-Corrente de polarização de entrada (I_b): Média entre as correntes dos dois terminais de entrada, com a saída em 0V.

-Desvio de corrente de entrada (I_{io}): Diferença entre as correntes dos dois terminais de entrada, com a saída em 0V.

-Deriva ou coeficiente de temperatura ($CT()$): É a taxa de variação dos parâmetros do ampop com a temperatura:

$CT(V_{io})$ - Deriva de V_{io} .

$CT(I_b)$ - Deriva de I_b .

$CT(I_{io})$ - Deriva de I_{io} .

-Excursão máxima de pico da tensão de saída (V_{op}): A máxima tensão de pico de saída, positiva ou negativa, que pode ser obtida, sem grampeamento, quando a tensão média de saída é zero.

-Ganho de tensão diferencial de malha aberta (A_d): Razão entre a variação da tensão de saída (ΔV_o) e a variação da tensão diferencial de entrada (ΔV_d) que a produziu, onde tensão diferencial de entrada (V_d) é a tensão entre as entradas do ampop.

-Ganho de tensão de modo comum (A_{cm}): Razão entre a variação da tensão de saída (ΔV_o) e a variação da tensão de modo comum de entrada (ΔV_{cm}) que a produziu, onde tensão de modo comum de entrada (V_{cm}) é a média das tensões das entradas do ampop.

-Razão de Rejeição de Modo Comum (CMRR): Razão entre o ganho de tensão diferencial de malha aberta (A_d) e o ganho de tensão de modo comum (A_{cm}).

-Razão de Rejeição da Fonte de Alimentação (PSRR): Razão entre a variação do desvio de tensão (ΔV_{io}) e a variação da tensão de alimentação (ΔV_{cc}) que a provocou.

-Resistência de saída (R_o): Resistência do estágio de saída do ampop, quando operando em malha aberta.

-Resistência diferencial de entrada (R_i): Resistência entre as duas entradas do ampop, quando operando em malha aberta.

-Frequência de ganho unitário (f_u): Frequência em que a curva do ganho diferencial de malha aberta (A_d) cruza o eixo das frequências, isto é, A_d apresenta valor unitário.

-Primeira frequência de corte (f_{c1}): Frequência em que o ganho diferencial (A_d) do ampop é 3dB abaixo do seu valor DC.

-Produto ganho banda (PGB): Produto da frequência pelo ganho diferencial de malha aberta (A_d) correspondente.

-"Slew rate" ou Taxa de variação (S_r): Máxima razão de mudança da tensão de saída em relação ao tempo, geralmente medida numa configuração de ganho unitário, com um degrau de grande amplitude aplicado na entrada.

-Tempo de subida (T_r): Tempo requerido para a tensão de saída ir de 10% a 90% do seu valor final, quando aplicado um degrau de pequena amplitude na entrada, de forma a não haver limitação pelo "slew rate". A configuração utilizada para medida geralmente é de ganho unitário.

- "Overshoot" ou Sobrepassagem (O_v): Porcentagem da tensão de saída final do ampop que informa o quanto ela é ultrapassada durante a resposta transitória (Supondo tensão de saída inicial de 0V).

- Tempo de acomodação (T_s): Tempo transcorrido entre a aplicação de um degrau na entrada, até o instante em que a saída fica dentro de uma faixa especificada em torno de seu valor final.

- Ruído de tensão de entrada (V_n): É a fonte de tensão de ruído equivalente que, se colocada na entrada de um ampop ideal, produziria, em sua saída, a mesma quantidade de ruído gerada no ampop real.

- Ruído de corrente de entrada (I_n): É a fonte de corrente de ruído equivalente que, se colocada na entrada de um ampop ideal, produziria, em sua saída, a mesma quantidade de ruído gerada no ampop real.

APÊNDICE 2

CIRCUITO COMPLETO DO INSTRUMENTO

O circuito completo do protótipo construído, foi dividido em quatro partes:

- Lazo de Medida.
- Circuitos auxiliares.
- Sistema de aquisição de dados (SAD).
- Interface com o PC.

O desenho foi feito no programa Tango Schematic, versão 3.31.

O protótipo foi montado em placa de circuito impresso universal, o que limitou os cuidados possíveis quanto ao "layout" da montagem. O circuito todo fica fora do PC, montado em várias placas interligadas. A conexão com o PC é feita através de uma placa encaixada num "slot", de onde são retirados fios.

Antes de passar a cada parte, são feitas algumas observações de ordem geral:

- Os resistores, que possuem um asterístico "*" após seu valor, são de precisão.
- As chaves analógicas utilizadas no medidor são do tipo AH0015CD, da National Semiconductor.
- Os pontos de todo o circuito que foram ligados ao SAD tiveram nome (net label) finalizados com um asterístico, por exemplo, Vs*.
- O terra digital, junto com o de potência, é representado por quatro traços, enquanto que o terra do sinal é representado por um único traço. A separação é feita para que não haja interferência do circuito digital no circuito analógico, no entanto, por necessidade, são interligados em um único ponto.

O Laço de Medida.

Serão dadas breves explicações sobre a fig.30, mas apenas sobre os pontos não abordados nos capítulos 1 e 2.

-Na saída do DUT, além da carga de $2K\Omega$ e do divisor resistivo, há também um resistor e dois diodos que protegem o AUX caso o DUT sature quando estiver com alimentação deslocada.

-O resistor de 10Ω , na entrada não inversora do DUT, balanceia as resistências vistas pelas entradas do DUT.

-Os capacitores de $1nF$, em paralelo com os resistores nas entradas do DUT, diminuem a possibilidade de instabilidade causada por esses resistores.

-A tensão de controle V_c é obtida de um amplificador de ganho dois, que amplifica uma senoide de 5V de pico. Quando a entrada desse amplificador é aterrada pela chave analógica, V_c torna-se 0V. A senoide de 10V de pico em V_c permite medida de A_d e $CMRR$ a uma baixa frequência, enquanto que $V_c=0V$ permite medir os demais parâmetros.

-O R e C, de compensação do Laço, são removíveis no protótipo e podem ter valores diferentes dos listados.

-O circuito S/H mostrado foi retirado das folhas de dados do componente SHC5320 da Burr-Brown, que foi utilizado.

do amplificador é aterrada pela chave analógica. O deslocamento senoidal é utilizado para medir o CMRR.

-O relê, controlado pelo PC através do transistor, permite desligar a alimentação +Vcc e -Vcc, na inserção ou retirada do DUT ou quando ele estiver danificado.

-A fonte de $\pm 15V$, para alimentação de todo o circuito analógico, exceto o DUT, também foi implementada com o 5C15D.

-Os detectores de pico possibilitam a medição da excursão da tensão de V_s^* na medição de CMRR e A_d , quando é utilizado a senoide no deslocamento da alimentação do DUT e/ou em V_c . Foi usado um TL082 devido ao baixo I_b , necessário para não descarregar os capacitores. As chaves analógicas descarregam os capacitores antes de cada medida.

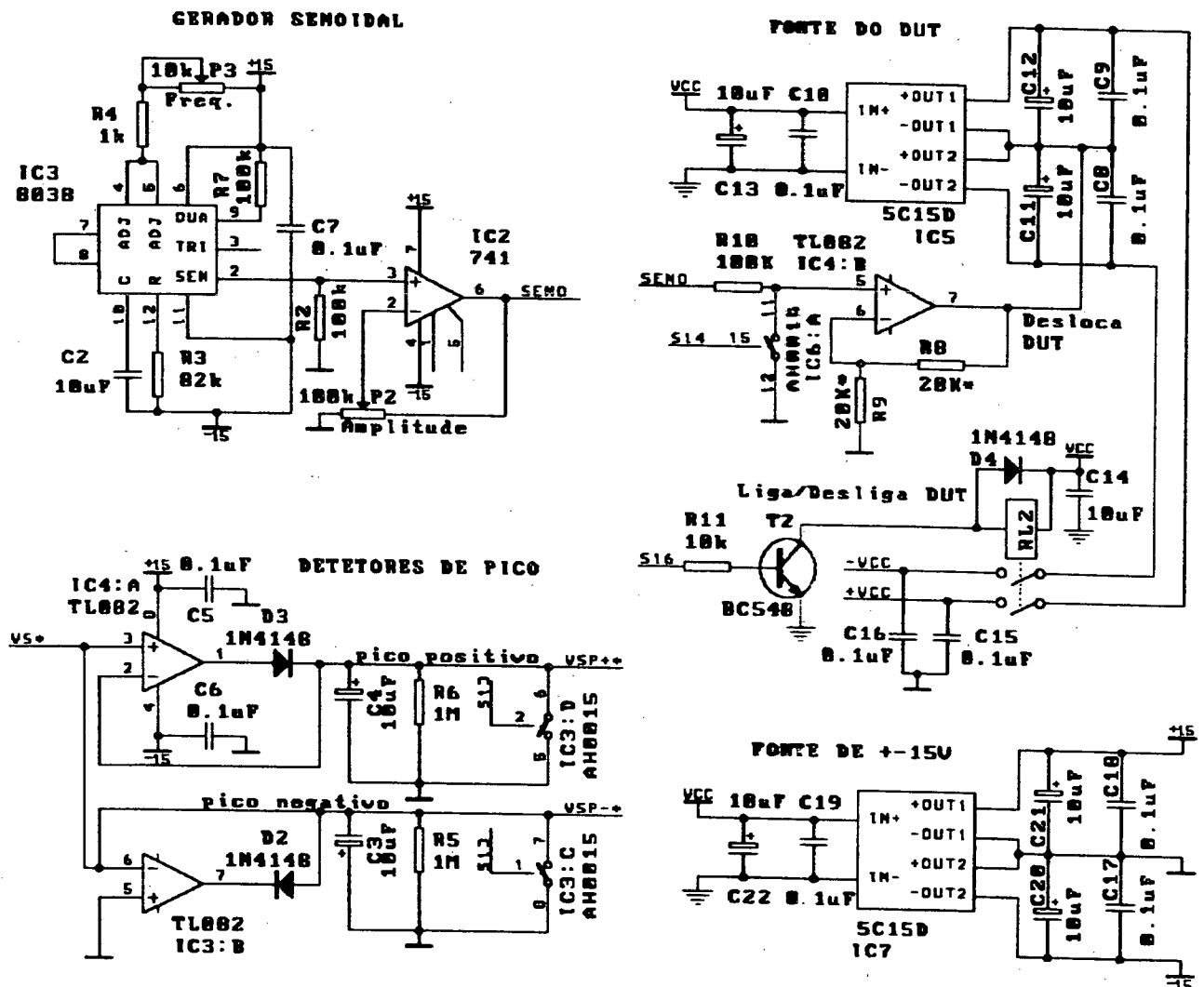


FIGURA 31. Circuitos auxiliares implementados

Sistema de aquisição de dados.

Algumas observações sobre o SAD, da fig.32, são:

-O multiplexador analógico AMUX (DG506 ou AD7506 da Analog Devices) permite ao A/D converter a tensão de diversos pontos do Laço. O canal S15, ligado ao neutro do sinal, permite ao PC correção do desvio do SAD.

-O circuito do AGP [7], de ganho 1 ou 10, devido à sua configuração, apresenta resistência de entrada muito alta e ganho independente das resistências das chaves analógicas. Foi usado o TL081 devido ao baixo I_b , pois as resistências vistas pelas entradas do amplificador variam conforme a configuração do SAD.

-O A/D de 12 bits da Burr-Brown (ADS570), com S/H interno, foi configurado para converter tensões de -10V a +10V.

-Nesse desenho também foi descrita a função de cada terminal do "slot" do PC [06].

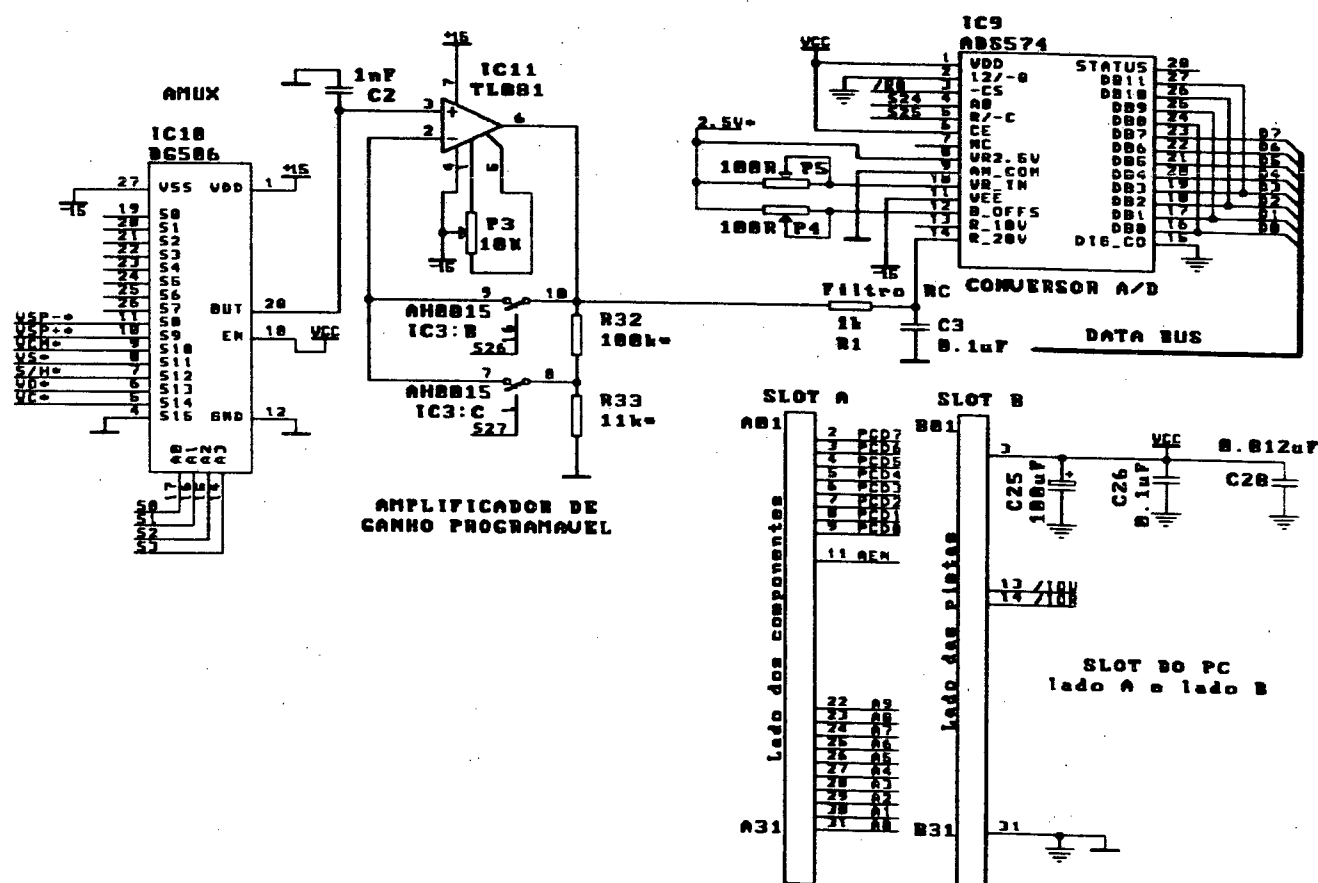


FIGURA 32. SAD implementado

Interface com o PC.

Em seguida breves descrições da interface com o PC [12], fig.33:

-O 74LS688 compara o endereço ajustado nos "dip-switchs" com o do barramento de endereços do PC e, quando iguais, habilita os CIs restantes.

-Quando habilitado pelo 74LS688, e caso seja uma operação de leitura I/O, o 74LS138 superior ativa a saída determinada pelo endereço A0, A1 e A2. O mesmo ocorre para o 74LS138 inferior, mas no caso de escrita I/O.

-O transceptor de barramento 74LS245 transmite dados na direção determinada pela linha /IOR quando estiver habilitado pelo 74LS688.

-Os "latches" de cada 74LS273 armazenam os dados do barramento de dados, sempre que forem endereçados através do 74LS138 inferior. A linha de /reset ligada a eles garante que quando o PC é ligado suas saídas fiquem em 0 e, com isso, todas as chaves analógicas iniciam abertas.

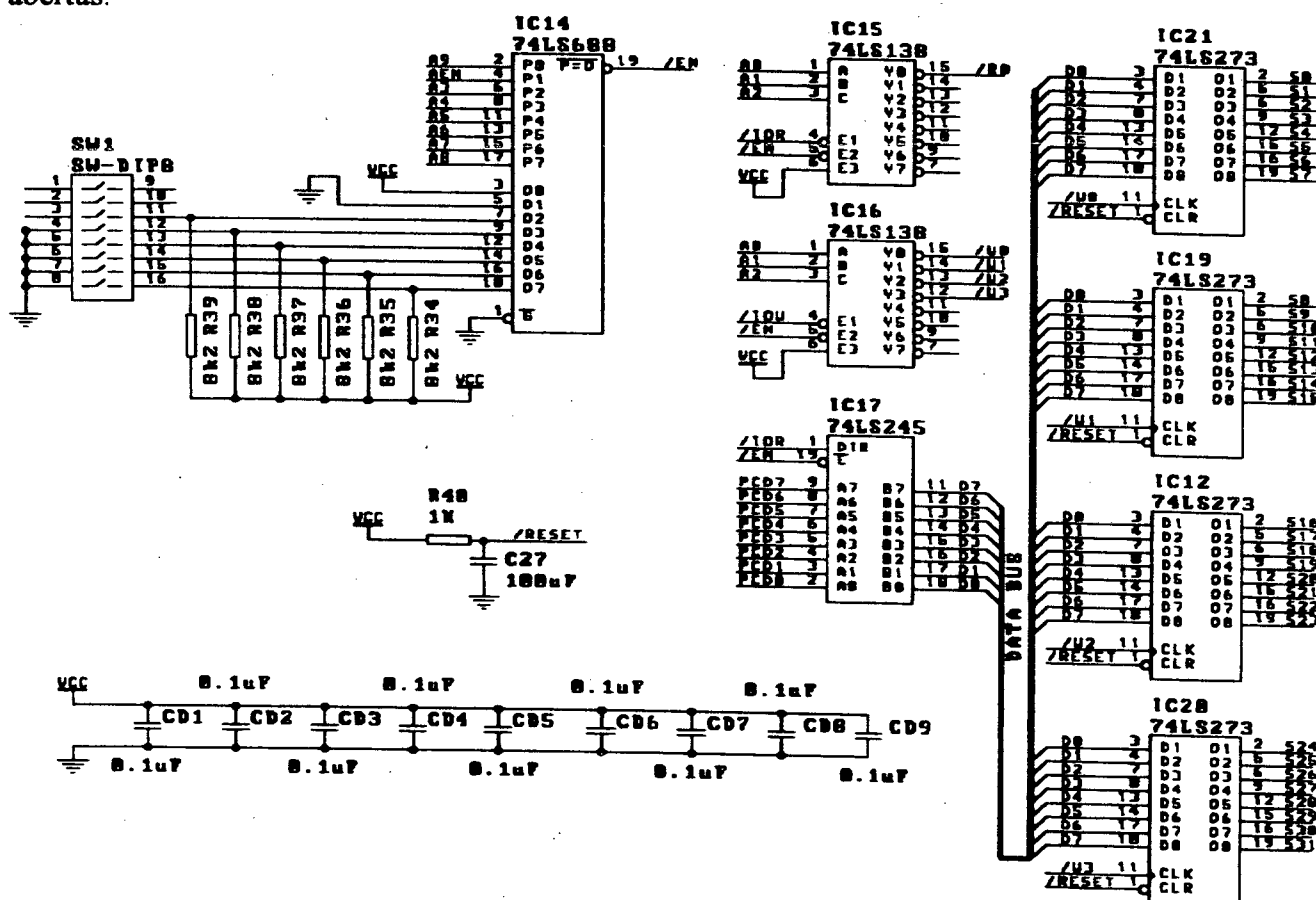


FIGURA 33. Interface com o PC implementada

APÊNDICE 3

PROCEDIMENTOS DE AJUSTE DOS CIRCUITOS

O protótipo apresenta os seguintes ajustes:

- Ajuste de desvio do A/D.
- Ajuste de ganho do A/D.
- Ajuste de desvio do AGP.
- Ajuste da carga do DUT.
- Ajuste da frequência da senoide de teste.
- Ajuste da amplitude da senoide.

Para entender os procedimentos descritos, é necessário ter a vista o esquema do circuito (Apêndice 2). Os procedimentos de ajuste adotados foram os mais simples possíveis, mesmo não sendo os mais precisos e foram integrados ao software para maior comodidade.

Ajuste de desvio do A/D.

-Retirar o TL081 do AGP de seu soquete.

-Aterrar, com o terra analógico, o pino 6 do soquete do TL081 retirado, que vai para a entrada do A/D.

-Ajustar o "trimpot" que se liga ao pino 12 do A/D (ajuste de desvio) de forma que a leitura do A/D seja 0V.

-Repetir interativamente esse ajuste e o de ganho.

Ajuste de ganho do A/D.

-Com o TL081 ainda retirado, ligar de 9V a 9,9V ao pino 6 de seu soquete.

-Ligar também um voltímetro nesse pino.

-Ajustar o "trimpot" que vai ligado ao pino 10 do A/D de forma que a leitura do A/D seja a mesma que a do voltímetro.

-Repetir interativamente esse ajuste com o de desvio.

Ajuste de desvio do AGP.

-Com o TL081 do AGP recolocado, ligar o AMUX no canal S15, que já está aterrado.

-Configurar o AGP em ganho 10 para amplificar o próprio desvio.

-Ajustar o "trimpot" de ajuste de desvio do TL081 até que a leitura do A/D seja 0V.

Ajuste da carga do DUT.

-Retirar qualquer ampop do soquete e ligar a carga, isto é, a chave que liga a carga.

-Ligar um multímetro para medir a resistência total de carga formada pela chave e "trimpot" em série e ajustar o "trimpot" até que seja lido 2.000Ω .

Ajuste da frequência da senoide de teste.

Na saída do gerador senoidal foi ligado um led para monitorar seu funcionamento.

Como a frequência é baixa, o "trimpot" é ajustado de forma que são contadas 150 piscadas do led em 1 min, o que corresponde a 2,5Hz. Pequeno erro na frequência não causa erro nos parâmetros medidos.

Ajuste da amplitude da senoide.

-Retirar o resistor removível de $1K\Omega$ em série com o potenciômetro de ajuste de frequência e colocar outro de $1M\Omega$, de forma que a frequência fique extremamente baixa.

-Por software, ligar o ponto V_{c^*} à senoide.

-Monitorar a tensão V_{c^*} , através do PC.

-Regular o potenciômetro de ajuste de amplitude da senoide de forma que a amplitude pico a pico de V_{c^*} seja 20V. O desvio existente não causa erro de medida.

-Recolocar o resistor de $1K\Omega$.

APÊNDICE 4

LISTAGEM DO SOFTWARE

```
/*
    PROGRAMA AMPOP.C - MEDIDA DE PARÂMETROS DE AMPOPS
*/
#include <stdio.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#define port0      0x300
#define port1      port0+1
#define port2      port0+2
#define port3      port0+3
#define ESTAB      10    /* Tempo de Estabilização do Loop em ms */
#define FREQ       2.5    /* Frequencia em Hz do gerador senoidal */
#define DEZ_MIL    10011 /* Ganho do Loop considerando a chave analógica */
#define MIL        1011  /* Ganho do Loop considerando a chave analógica */
#define TESTE();    if(kbhit()) break; if(Vop<9) { desliga_vcc(); amostra();
clrscr(); printf("\n Ampop RUIM \n\n Precione Enter"); test=getch(); break; }
#define INTERVALO  100 /* Intervalo entre uma medida e outra */
#define VCC        14.15 /* Valor medido da alimentação do DUT */
int byte0, byte1, byte2, byte3, ganho;
char test;
float x[12]; /* Dez medidas mais a média e a Incerteza das medidas */
float vsat1, vsat2; /* Tensões de saturação positiva e negativa */
/*****
*/
    FUNÇÕES DE GERENCIAMENTO DAS CHAVES ANALÓGICAS
*/
/* fecha uma chave (de 0 a 31), não alterando as demais. Ex: fecha(7); */
/* O número 2 elevado à posição da chave dentro do byte resulta num byte
com 1 apenas na posição da chave a fechar. Um "ou" com o byte que representa
o estado atual do byte de chaves resulta no byte que abre a chave sem
alterar as demais. Para isso deve ser escrito no endereço correspondente */

void fecha (char ch)
{
    if(ch<=7)          byte0 =byte0|(int)pow(2,(double)ch);
    if(8<=ch<=15)      byte1 =byte1|(int)pow(2,(double)(ch-8));
    if(16<=ch<=23)     byte2 =byte2|(int)pow(2,(double)(ch-16));
    if(24<=ch<=31)     byte3 =byte3|(int)pow(2,(double)(ch-24));
    if((ch<0)|| (ch>31)) printf("\n Número de chave inexistente");
    outportb(port0, byte0);
    outportb(port1, byte1);
    outportb(port2, byte2);
    outportb(port3, byte3);
}

/* Abre uma chave (de 0 a 31), não alterando as demais. Ex: abre(0); */
/* Nesta função como é desejado abrir uma chave é feito um "e" com um
byte setado em 0 apenas na posição da chave */

void abre (char ch)
{
```

```

if(ch<=7)          byte0 =byte0~(int)pow(2,(double)ch);
if(8<=ch<=15)      byte1 =byte1~(int)pow(2,(double)(ch-8));
if(16<=ch<=23)      byte2 =byte2~(int)pow(2,(double)(ch-16));
if(24<=ch<=31)      byte3 =byte3~(int)pow(2,(double)(ch-24));
if((ch<0)|| (ch>31)) printf("\n Parâmetro errado passado para abre()");
outportb(port0, byte0);
outportb(port1, byte1);
outportb(port2, byte2);
outportb(port3, byte3);
}

/* Estabelece vc: 0V ou uma senoide de 20Vpp. ex: set_vc(20); */

void set_vc(int tensao)
{
    abre(19);
    switch(tensao)
    {
        case 0: fecha(19); break;
        case 20: break; /* Tensão senoidal */
        default: printf ("\n Parâmetro errado passado a set_vc()");
    }
}

/* Estabelece vcm: 0V ou uma senoide de 20Vpp. ex: set_vcm(0); */

void set_vcm(int tensao)
{
    abre(14);
    switch(tensao)
    {
        case 0: fecha(14); break;
        case 20: break;
        default : printf ("\n Parâmetro errado passado à função set_vcm()");
    }
}

/* Funções de gerenciamento de chaves */

void liga_carga(void) { fecha(17); } /* Liga 2K à saída do DUT */
void desliga_carga(void) { abre (17); }
void amostra(void) { abre (23); } /* Faz com que o S/H amostre */
void mantem(void) { fecha(23); }
void liga_vcc(void) { fecha(16); } /* Liga a alimentação do DUT */
void desliga_vcc(void) { abre (16); }

/* Descarrega os capacitores dos detetores de pico de vs* */
void descarrega(void) { fecha(13); delay(100); abre(13); }

/* Liga a realimentação de ganho 1.000 ou 10.000 do Loop, quando é passado
1 ou 10 como parâmetro. ex: liga_real(10); */

void liga_real(int ganho)
{
    switch(ganho)
    {
        case 1: fecha(18); abre(21); break;
    }
}

```

```

        case 10: fecha(21); abre(18); break;
        default: printf("Erro no parâmetro passado para a função liga_real");
    }
}

/* Desliga qualquer realimentação do Loop */
void desliga_real(void) { abre(18); abre(21); }

/* Função de estabelecimento da resistência desejada na entrada inversora
podendo ser em Kohm: 0, 10, 100 ou 110.    ex: ent_inv(10);    */
void ent_inv(int R)
{
    switch(R)
    {
        case 0: fecha(10); fecha(11); break;
        case 10: abre (10); fecha(11); break;
        case 100: fecha(10); abre (11); break;
        case 110: abre (10); abre (11); break;
        default: printf("\n Erro de parâmetro passado a ent_inv()");
    }
}

/* Função de estabelecimento da resistência desejada na entrada não
inversora, podendo ser em Kohm: 0, 10, 100 ou 110.  ex: ent_ao_inv(10); */
void ent_ao_inv(int R)
{
    switch(R)
    {
        case 0: fecha(9); fecha(8); break;
        case 10: fecha(9); abre (8); break;
        case 100: abre (9); fecha(8); break;
        case 110: abre (9); abre (8); break;
        default : printf("\n Parâmetro errado %d passado a ent_ao_inv()",R);
    }
}

/*****
/*
        FUNÇÕES RELACIONADAS ÀS LEITURAS DO A/D
*/
/* Efetua uma leitura do que esteja na entrada do A/D e retorna um float
O ganho dado pelo Amplificador programável deve ser passado como parâmetro
, sendo 1 ou 10.    Ex: f=ler_ad(10);    */

float ler_ad (int ganho)
{
    unsigned int b0,b1;
    float b;
    abre(26); abre(27); abre(28);
    switch(ganho)
    {
        case 1: fecha(26); break;
        case 10: fecha(27); break;
        default: printf(" Erro do ganho passado para a função ler_ad() ");
    }
    abre(24);
    /* A0 conversão de 12/-8 bits */

```

```

abre(25);          /* R/-C Conversão          */
delay(5);          /* Tempo de carga do C do filtro da entrada do A/D */
b0 = inportb(port0); /* Inicia conversão          */
delay(1);          /* Tempo de conversão        */
fecha(25);         /* Leitura                    */
fecha(24); b0 = (unsigned int)inportb(port0); /* 4 LSB: xxxx0000 */
abre(24); b1 = (unsigned int)inportb(port0); /* 8 MSB: xxxxxxxx */
b=(float)(b0/16+b1*16)/4096;
b=20*b-10;
b= 1.012*b; /* Compensação do divisor formado pela resistência de entrada */
            /* típica de 84K do A/D e 1K do filtro em sua entrada. */
return (b);
}

/* Configura o AMUX num canal, de 0 a 15, passado como parâmetro */

void set_canal(char canal)
{
    abre(0); abre(1); abre(2); abre(3); /* Zera o endereçamento do AMUX */
    byte0=byte0|(int)canal; /* Seta novo endereço sem alterar os bits 4, 5, */
    outportb(port0, byte0); /* 6 e 7 do byte0 que possuem outras funções */
}

/* Converte em digital a tensão do canal, de 0 a 15, passado como parâmetro.
   O melhor ganho 1 ou 10 é ajustado automaticamente, assim como o melhor
   ganho do Loop, 1.000 ou 10.000. Ex: f=canal(0);
   Obs: Para os canais 8 e 9 usar a função viopp(), que é equivalente. */

float canal (char canal)
{
    float ad, ad1, ad10, ad100;
    set_canal(canal);
    liga_real(1); /* Realimentação com 10Kohm no Loop. Ganho 1.000 */
    delay(ESTAB); /* Tempo de estabilização do Loop */
    ad1=ler_ad(1); /* Leitura com ganho 1.000 no Loop e 1 no AGP */
    liga_real(10); /* Realimentação com 100Kohm no Loop. Ganho 10.000 */
    delay(ESTAB);
    ad10=ler_ad(1); /* Leitura com ganho 10.000 no Loop e 1 no AGP */
    ad100=ler_ad(10); /* Leitura com ganho 10.000 no Loop e 10 no AGP */
    ad=ad1;
    ganho=MIL;
    if( (ad>-1)&&(ad<1) ) { ad=ad10; ganho=DEZ_MIL;}
    if( (ad>-1)&&(ad<1) ) { ad=ad100/(100/11+1); ganho=DEZ_MIL; }
    return(ad);
}

/* Funções equivalentes a anterior, para os canais 8 e 9, pois são as
   medidas das tensões de pico de vs, que necessitam do zeramento da tensão
   dos capacitores e em seguida uma espera de 1.5 ciclos da senoide. A função
   retorna a variação de pico a pico da tensão de offset do DUT em mV. */

float viopp (void)
{
    int ganhop, ganhon;
    float adp, adn, adlp, adln, ad10p, ad10n, ad100p, ad100n;
    set_canal(9); /* Canal da saída do detetor de pico positivo */
    liga_real(1); /* Ganho 1000 para o Loop */

```

```

descarrega(); /* Descarrega os capacitores dos detetores do pico */
delay(1500/FREQ); /* Aguarda um ciclo e meio para deter os picos */
adlp=ler_ad(1); /* Leitura do pico positivo */
set_canal(8); /* Canal da saída do detetor de pico negativo */
adln=ler_ad(1); /* Leitura do pico negativo */
liga_real(10); /* Ganho 10.000 para o Loop */
descarrega(); /* Descarrega os capacitores dos detetores do pico */
delay(1500/FREQ); /* Aguarda um ciclo e meio para deter os picos */
ad10n=ler_ad(1); /* Leitura do pico negativo com ganho 1 do AGP */
ad100n=ler_ad(10); /* Leitura do pico negativo com ganho 10 do AGP */
set_canal(9); /* Canal da saída do detetor de pico positivo */
ad10p=ler_ad(1); /* Leitura do pico positivo com ganho 1 do AGP */
ad100p=ler_ad(10); /* Leitura do pico positivo com ganho 10 do AGP */
/* Escolhas da melhores das medidas feitas */
adp=adlp; ganhop=MIL;
if( (adp>-1)&&(adp<1) ) { adp=ad10p; ganhop=DEZ_MIL; }
if( (adp>-1)&&(adp<1) ) { adp=ad100p/(100/11+1); ganhop=DEZ_MIL; }
adn=adln; ganhon=MIL;
if( (adn>-1)&&(adn<1) ) { adn=ad10n; ganhon=DEZ_MIL; }
if( (adn>-1)&&(adn<1) ) { adn=ad100n/(100/11+1); ganhon=DEZ_MIL; }
amostra(); /* O S/H amostrando apresenta consumo menor */
return(1000*(adp/ganhop-adn/ganhon));
}

/* Funções de leitura da tensão de cada um dos pontos do circuito */
/* A multiplicação por 2 em vo é devida ao divisor com res. de 100K e em
vc é devido a esta tensão ser medida antes do amplificador de ganho 2 */
float vc (void) { return( 2*canal(14) ); } /* Tensão de controle */
float vo (void) { return( 2*canal(13) ); } /* Tensão de saída do DUT */
float sh (void) { return( canal(12) ); } /* Tensão de saída do S/H */
float vs (void) { return( canal(11) ); } /* Tensão de saída do AUX */
float vcm(void) { return( canal(10) ); } /* Tensão de modo comum do DUT */

/*****
/*

FUNÇÕES DE MEDIDA DE PARÂMETROS

*/
/* Função que coloca o circuito no padrão inicial, isto é:
-Alimentação analógica ligada
-Resistores das entradas do Ampop em curto.
-Tensão de controle e de modo comum iguais a zero
-S/H retendo ,isto é, compensando o valor da tensão de offset do ampop
Obs: O laço de realimentação não é fechado. */

void padrao(void)
{
byte0 = byte1 = byte3 = 0; /* Desliga todas as chaves, */
byte2 = 1; /* menos a alimentação analógica */
ent_inv(0);
ent_ao_inv(0);
set_vc(0);
set_vcm(0);
delay(ESTAB); /* Tempo de estabilização do circuito e de amostragem */
mantem(); /* Mantem o Vio amostrado */
}

/* Obtem a tensão de offset do Ampop nas condições em que ele se encontra,

```

levando em conta a tensão retida no S/H e a tensão existente em vs.

O offset é a tensão acumulada no S/H mais a tensão em vs divididas pelos respectivos ganhos. A tensão do S/H é medida antes e depois de vs para compensar o dropout do S/H. */

```
float vio (void)
```

```
{
    float sh1,vs1,sh2;
    sh1=sh()/1001; vs1=vs()/ganho; sh2=sh()/1001;
    amostra(); /* O S/H amostrando apresenta consumo menor */
    return( 1000*(((sh1+sh2)/2)+vs1) ); /* Retorna valor em mV */
}
```

/* Função que retorna o parâmetro tensão de offset do Ampop em mV */
 /* Este parâmetro é simplesmente a tensão de offset que o DUT apresenta quando nas condições iniciais. */

```
float vio_ampop(void)
```

```
{
    padrao();
    return(vio());
}
```

/* Função que retorna o valor da corrente de offset, quando passado como parâmetro, o valor dos resistores a serem inseridos nas entradas, sendo 10 ou 100, em Kohm. ex: iio2=iio(100); */

```
float iio0(int Rin)
```

```
{
    float Iio, vio0, viol, vio2, vio3, Ri ;
    padrao();
    vio0=vio(); /* Mede o offset sem resistores nas entrada */
    ent_inv(Rin);
    ent_nao_inv(Rin);
    viol=vio(); /* Mede o offset com os resistores nas duas entradas */
    ent_inv(0);
    ent_nao_inv(0);
    vio2=vio(); /* Mede novamente o offset sem os resistores para
                  compensar o dropout */
    Ri=Rin*1000-100; /* 100 é a resistência da chave analógica e Ri [ohm]
                     é a resistência que efetivamente varia de um estado
                     a outro.*/
    vio3=(vio0+vio2)/2;
    Iio=1e+6*(viol-vio3)/Ri;
    if(Iio<0) Iio=-Iio;
    return(Iio); /* Retorna Iio em nA.*/
}
```

/* Função que obtém o valor da corrente de offset utilizando, automaticamente, o melhor resistor nas entradas. ex: iio1=iio(); */
 /* É utilizado 10K para 1uA a 95nA e 100K para o restante da faixa */

```
float iio(void)
```

```
{
    float iio1=iio0(10);
    if(iio1<95) iio1=iio0(100); /*Pode-se retirar 100K devido a instabilidade */
    return(iio1);
}
```

```

}

/* Função que retorna o valor da corrente de polarização, quando passado,
como parâmetro, um número positivo para medir Ib da entrada não inversora
ou um número negativo para a entrada inversora. Como segundo parâmetro
deve ser passado o valor do resistor a ser inserido na entrada,
sendo 10 ou 100, em Kohm. ex: Ib=ib(-1,100); */

float ib0(ent,Rin)
int ent,Rin;
{
float ib,vio0,vio1,vio2;
padrao();
vio0=vio();
if(ent>0) ent_nao_inv(Rin);
if(ent<0) ent_inv(Rin);
vio1=vio();
ent_nao_inv(0);
ent_inv(0);
vio2=vio();
amostra(); /* O S/H amostrando apresenta consumo menor */
ib=-1e+6*(vio1-(vio0+vio2)/2)/(Rin*1000-100); /*100 é da CH analógica*/
if(ib<0) ib=-ib; /* Módulo de Ib */
return(ib); /* Retorna Ib em nA */
}

/* Função que obtém o valor de Ib na entrada inversora, utilizando,
automaticamente, o melhor resistor nas entradas.
É utilizado 10K para 1uA a 95nA e 100K para o restante da faixa */

float ib_inv(void)
{
float Ib=ib0(-1,10);
/* if(Ib<95) Ib=ib0(-1,100); Foi retirado 100K devido a instabilidade */
return(Ib);
}

/* Função que obtém Ib da entrada não inversora utilizando,
automaticamente, o melhor resistor nas entradas.
É utilizado 10K para 1uA a 95nA e 100K para o restante da faixa */

float ib_nao_inv(void)
{
float Ib=ib0(1,10);
/* if(Ib<95) Ib=ib0(1,100); Foi retirado 100K devido a instabilidade */
return(Ib);
}

/* Função de cálculo do parâmetro Ib */
float ib(void) { return( ( ib_nao_inv()+ib_inv() )/2 ); }

/* Função de cálculo de Iio a partir de Ib+ e Ib- medidos */

float iio_calc(void)
{
float Iio_calc = ib_nao_inv()-ib_inv();
if(Iio_calc<0) Iio_calc=-Iio_calc;
}

```

```

return(Iio_calc);
}

/* Função de medida do ganho do ampop. ex: f=ad(); */

float ad(void)
{
    padrao();
    set_vc(20);          /* Tensão senoidal em Vc de 20V pico a pico */
    return( 20/viopp());
}

/* Função de medida da relação de rejeição de modo comum. ex: f=cmrr(); */

float cmrr(void)
{
    padrao();
    set_vc(20);
    set_vcm(20);
    return( 20/viopp());
}

/* Satura o ampop positiva ou negativamente conforme 1 ou -1 passado como
parâmetro ex: satura(1); */

void satura(int sinal)
{
    abre(15); abre(12);
    ent_ao_inv(110); /* Proteção das entradas e divisor de tensão com R=10K */
    ent_inv(110);    /* Equalização com a entrada não inversora */
    desliga_real(); /* Abre o Loop */
    switch(sinal)
    {
        case 1: fecha(15); break; /* Satura positivamente +Vsat */
        case -1: fecha(12); break; /* Satura negativamente -Vsat */
        default: printf("Erro do parâmetro passado a void satura (int sinal)");
    }
}

/* Função de medida da tensão de saturação do ampop, sendo necessário
passar 1 ou -1 para saturar positiva ou negativamente */

float vsat(int sinal)
{
    float Vo;
    padrao();
    liga_carga();
    satura(sinal);
    Vo=vo();
    desliga_carga();
    amostra(); /* Diminui o consumo do S/H */
    return(Vo);
}

/* Função que mede as tensões de saturação positiva e negativa, retornando
o módulo da que, em módulo, é menor. Essa função também inicializa as
variáveis globais vsat1 e vsat2. */

```



```

float vop(void)
{
    float vmin;
    vsat1=vsat(1)+15-VCC; /* Correção para alimentação diferente de 15V */
    vsat2=-vsat(-1)+15-VCC;
    if (vsat1<vsat2) vmin=vsat1;
    else vmin=vsat2;
    vsat2=-vsat2;
    return(vmin);
}

void estat(void)
{
    int n=10; /* Número de leituras */
    int i;
    x[10]=x[11]=0; /* Inicialização */
    for(i=0; i<n; i++) x[10]=x[10]+x[i]/n; /* Média */
    for(i=0; i<n; i++) x[i]=x[i]-x[10]; /* Erro aleatório */
    for(i=0; i<n; i++) x[i]=x[i]*x[i]; /* Quadrado do Erro aleatório */
    for(i=0; i<n; i++) x[11]=x[11]+x[i]; /* Somatório */
    x[11]=sqrt(x[11])/(n-1); /* Desvio padrão */
    x[11]=(100*4.1*x[11])/x[10]; /* Dispersão percentual */
    /* Obs: O número 4.1 é um coeficiente que corrige para 3 desvios padrões
    a dispersão calculada com o desvio padrão de apenas 10 medidas. */
    if(x[11]<0) x[11]=-x[11]; /* Módulo */
}

/* Funcao que retorna em dB o valor de n passado, em milhares */
float dB (float n) { return(20*log10(1000*n)); }

/* Função de medida de todos os parâmetros de ampops */

void param(void)
{
    char c;
    int i,j,k;
    float lixo;
    float Vop;
    char ampop[20];
    float f,vio1,vio2,vio3,vio4,vio5,vio6,vio7,vio8,vio9,vio10;
    desliga_vcc(); /* Desliga se por acaso já esteja ligada */
    clrscr();
    printf(" \n\n          MEDIDA DE PARÂMETROS");
    for(;;)
    {
        printf("\n\n Coloque o ampop no textool e pressione [Enter] ou ");
        printf(" \n para finalizar pressione [Q]");
        while(!kbhit()); /* Fica mostrando a mensagem até a pressão de uma tecla */
        c=getch();
        if(c=='q' || c=='Q') break; /* Se a tecla for "q" esta rotina para. */
        liga_vcc();
        clrscr();
        /* Reconhecimento do Ampop para utilizar Print Screen */
        /* printf("Ampop = "); scanf("%s",&ampop); */
        /* Preparação da tela para exibir os parâmetros medidos */
        printf("[Enter]-Menu Principal");
    }
}

```

```

gotoxy(30,02); printf("PARÂMETROS MEDIDOS:");
gotoxy(10,04); printf("Vio [mV]");
gotoxy(10,05); printf(" +-3% ");
gotoxy(22,04); printf("Ib [nA] ");
gotoxy(22,05); printf(" +-4% ");
gotoxy(34,04); printf("Iio [nA]");
gotoxy(32,05); printf("+-4%+-1.5%Ib");
gotoxy(46,04); printf("Ad [K] ");
gotoxy(46,05); printf("+-6% ");
gotoxy(58,04); printf("CMRR [K]");
gotoxy(58,05); printf("+-6% ");
gotoxy(70,04); printf("Vop [V] ");
gotoxy(70,05); printf("+-3.5% ");
printf("\n-----");
printf("-----");
/* Leitura para calcular Vop para testa-lo */
/* TESTE() termina as medidas se o DUT estiver queimado, for retirado
do textool, se a alimentação for desligada ou se for precionado [Q] */
Vop=vop(); TESTE();
for(i=7; i<17; i++) { gotoxy(03,i); printf("%d", i-6 ); }
gotoxy(02,i+1); printf("Media");
gotoxy(02,i+3); printf("Disp+-");
gotoxy(02,i+4); printf("99,7%");
for(j=1; j<3; j++)
{
    for(i=7; i<17; i++)
    {
        delay(1000); gotoxy(10,i); printf("%2.3f", x[i-7]=vio_ampop() );
    }
    estat();
    gotoxy(10,i+1); printf("%2.3f", x[10]);
    gotoxy(10,i+3); printf("%1.1f% ", x[11]);
}
if(kbhit()) break;
for(i=7; i<17; i++)
{ delay(INTERVALO); gotoxy(10,i); printf("%2.3f", x[i-7]=vio_ampop() );

estat();
gotoxy(10,i+1); printf("%2.3f", x[10]);
gotoxy(10,i+3); printf("%1.1f% ", x[11]);
if(kbhit()) break;
for(i=7; i<17; i++)
{ delay(INTERVALO); gotoxy(22,i); printf("%4.1f", x[i-7]=ib() ); }
estat();
gotoxy(22,i+1); printf("%4.1f", x[10]);
gotoxy(22,i+3); printf("%1.1f% ", x[11]);
if(kbhit()) break;
for(i=7; i<17; i++)
{ delay(INTERVALO); gotoxy(34,i); printf("%4.1f", x[i-7]=iio() ); }
estat();
gotoxy(34,i+1); printf("%4.1f", x[10]);
gotoxy(34,i+3); printf("%1.1f% ", x[11]);
if(kbhit()) break;
for(i=7; i<17; i++)
{ delay(INTERVALO); gotoxy(46,i); printf("%4.1f", x[i-7]=ad() ); }
estat();
gotoxy(46,i+1); printf("%4.1f", x[10]);

```

```

gotoxy(46,i+2); printf("%3.1fdB", dB(x[10]));
gotoxy(46,i+3); printf("%1.1f% ", x[11]);
if(kbhit()) break;
for(i=7; i<17; i++)
    { delay(INTERVALO); gotoxy(58,i); printf("%4.1f", x[i-7]=cmrr() ); }
estat();
gotoxy(58,i+1); printf("%4.1f", x[10]);
gotoxy(58,i+2); printf("%3.1fdB", dB(x[10]));
gotoxy(58,i+3); printf("%1.1f% ", x[11]);
if(kbhit()) break;
for(i=7; i<17; i++)
    {
        delay(INTERVALO); gotoxy(67,i); x[i-7]=vop();
        printf("%2.1f %2.1f",vsat1, vsat2 );
    }
estat();
gotoxy(70,i+1); printf("%2.1f", x[10]);
gotoxy(70,i+3); printf("%1.1f% \n", x[11]);
desliga_vcc();
}
}
/*****
/*
                FUNÇÃO DE TESTE BOM/RUIM DE AMPOPS
*/
/* Verifica se o ampop atinge pelo menos +-10V na saída, carregado com 2K.*/

void teste (void)
{
    char c;
    float vol,vo2;
    clrscr();
    printf("\n\n                TESTE DE AMPOP ");
    for(;;)
    {
        printf("\n\n Coloque o ampop no texttool e pressione [Enter] ou ");
        printf(" \n para finalizar pressione [Q]");
        while(!kbhit());
        c=getch();
        if(c=='q' || c=='Q') break;
        clrscr();
        liga_vcc();
        liga_carga();
        delay(100); /* Estabilização da alimentação */
        vol=vsat(1);
        vo2 =vsat(-1);
        printf("\n\n Com 2K de carga: ");
        printf("\n\n +Vop = %f",vol);
        printf("\n\n -Vop = %f",vo2);
        desliga_vcc();
        if((vol>10.0) & (vo2<-10.0))
        {
            printf("\n\n Ampop BOM");
            sound(200); delay(100); nosound(); /* Aviso sonoro de Ampop BOM */
        }
        else
        {

```

```

    printf("\n\n Ampop RUIM ");
    sound(1000); delay(100); nosound(); delay(100); /* Aviso sonoro */
    sound(1000); delay(100); nosound(); delay(100); /* de ampop Ruim */
    sound(1000); delay(100); nosound(); delay(100);
}
}
}

/*****

/*          FUNÇÕES DE TESTE DO INSTRUMENTO          */

/* Converte em digital a tensão do canal, de 0 a 15, passado como parâmetro.
O melhor ganho 1 ou 10 é ajustado automaticamente. Esta função foi contruida
para a função volt_rep(), usada pela função verif(). Não é ajustado o ganho
da realimentação que fica por conta do usuário da função verif().
Ex: f=canal0(0); */

float canal0 (char canal)
{
    float ad, ad1, ad10;
    set_canal(canal);
    ad1=ler_ad(1);
    ad10=ler_ad(10);
    ad=ad1;
    if( (ad>-0.9)&&(ad<0.9) ) ad=ad10/(100/11+1);
    return(ad);
}

/* Função que repetidamente lê e mostra o valor da tensão em todos os
pontos do circuito. */

void volt_rep(void)
{
    char ch;
    float GND, Vc, Vo, SH, Vs, Vcm, Vio, Vsp, Vsn, Vspp;
    clrscr();
    while(!kbhit())
    {
        Vc=2*canal0(14); Vo=2*canal0(13); SH=canal0(12); Vs=canal0(11);
        Vcm=canal0(10); Vsp=canal0(9); Vsn=canal0(8); Vspp=Vsp-Vsn;
        GND=canal0(15);
        gotoxy(02,02); printf("Vc =%fV ", Vc );
        gotoxy(22,02); printf("Vcm =%fV ", Vcm );
        gotoxy(42,02); printf("Vspp=%fV ", Vspp);
        gotoxy(62,02); printf("Vsp =%fV ", Vsp );
        gotoxy(02,04); printf("Vo =%fV ", Vo );
        gotoxy(22,04); printf("S/H =%fV ", SH );
        gotoxy(42,04); printf("Vs =%fV ", Vs );
        gotoxy(62,04); printf("Vsn =%fV ", Vsn );
        gotoxy(02,06); printf("GND =%fV ", GND );
        gotoxy(02,8); printf("Para interromper as leituras pressione [Enter]");
        delay(500);
    }
    while(!getche());
    clrscr();
}

```

/* Programa que permite fazer quase que manualmente as medidas de parâmetros e verificar o funcionamento do circuito em cada condição estabelecida. */

```
void verif(void)
{
    char a='a';
    clrscr();
    printf("\n\n          TESTE DO INSTRUMENTO");
    printf("\n\n Coloque um ampop no textool e pressione [Enter]");
    while(!getche());
    liga_vcc();
    for(;a!='q' && a!='Q';)
    {
        volt_rep();
        printf("\n");
        printf("  [Y]  OK em e- e e- \n");
        printf("  [A]  10K em e- e 0 em e+ \n");
        printf("  [S]  10K em e+ e 0 em e- \n");
        printf("  [D]  100K em e- e e- \n");
        printf("  [H]  Padrao \n");
        printf("  [G]  Vcm=0V \n");
        printf("  [P]  Vcm=seno \n");
        printf("  [K]  Carga 2K \n");
        printf("  [I]  Sem Carga \n");
        printf("  [L]  Loop com ganho 1.000 \n");
        printf("  [9]  Loop com ganho 10.000 \n");
        printf("  [O]  Loop Aberto \n");
        printf("  [Z]  Saturação + \n");
        printf("  [M]  Saturação - \n");
        printf("  [C]  Vc=0V \n");
        printf("  [U]  Vc=seno \n");
        printf("  [B]  Amostra \n");
        printf("  [N]  Mantem \n");
        printf("  [E]  Descarrega \n");
        printf("  [1]  Fazer nada \n");
        printf("  [Q]  QUIT \n \n");
        printf(" Pressione a tecla correspondente à opção desejada:");
        while((a=getch())=='\n');
        switch(a)
        {
            case 'y': ent_inv(0); ent_nao_inv(0); break;
            case 'a': ent_inv(10); ent_nao_inv(0); break;
            case 's': ent_inv(0); ent_nao_inv(10); break;
            case 'd': ent_inv(100); ent_nao_inv(100); break;
            case 'g': set_vcm(0); break;
            case 'h': padrao(); break;
            case 'p': set_vcm(20); break;
            case 'k': liga_carga(); break;
            case 'i': desliga_carga(); break;
            case 'l': liga_real(1); break;
            case '9': liga_real(10); break;
            case 'o': desliga_real(); break;
            case 'z': satura(1); break;
            case 'm': satura(-1); break;
            case 'c': set_vc(0); break;
        }
    }
}
```

```

        case 'u': set_vc(20);                break;
        case 'b': amostra();                 break;
        case 'n': mantem();                  break;
        case 'e': descarrega();              break;
        case 'l':                             break;
        case 'q': desliga_vcc(); amostra();   break;
        default: sound(200); delay(200);      nosound();
    }
}
}
/*****
/*
                                FUNÇÕES DE AJUSTE DO INSTRUMENTO
*/

void offset_ad (void)
{
    char c;
    clrscr();
    printf("\n\n          AJUSTE DO OFFSET DO A/D\n\n");
    printf("\n\n Instruções:\n\n");
    printf("\n\n -Retire o TL081 do AGP de seu soquete.\n\n");
    printf("\n\n -Ligue o terra analógico no pino 6 do soquete do TL081.\n\n");
    printf("\n\n -Quando executar as instruções acima precione [Enter] e\n\n");
    printf("\n\n então ajuste o trimpot ligado ao pino 12 do A/D até zerar\n\n");
    printf("\n\n as leituras.\n\n");
    c=getchar(); /* Aguarda pressão de tecla */
    volt_rep();
    printf("\n\n Repetir interativamente este ajuste e o de ganho\n\n");
    printf("\n\n Pressione [Enter]\n\n");
    while(!kbhit());
}

void ganho_ad (void)
{
    char c;
    clrscr();
    printf("\n\n          AJUSTE DO GANHO DO A/D\n\n");
    printf("\n\n Instruções:\n\n");
    printf("\n\n -Retire o TL081 do AGP de seu soquete, se ainda não tirou.\n\n");
    printf("\n\n -Ligue de 9V a 9,9V e um voltímetro no pino 6 do soquete.\n\n");
    printf("\n\n -Quando executar as instruções acima precione [Enter] e\n\n");
    printf("\n\n então ajuste o trimpot ligado ao pino 10 do A/D até que a\n\n");
    printf("\n\n leitura do PC seja a mesma que a dc voltímetro.\n\n");
    c=getchar(); /* Aguarda pressão de tecla */
    volt_rep();
    printf("\n\n Repetir interativamente este ajuste e o de offset\n\n");
    printf("\n\n Pressione [Enter]\n\n");
    while(!kbhit()); /* Aguarda pressão de tecla */
}

void offset_agp(void)
{
    char c;
    clrscr();
    printf("\n\n          AJUSTE DO OFFSET DO AGP\n\n");
    printf("\n\n Instruções:\n\n");

```

```

printf("\n\n -Com o TL081 recolocado precione [Enter] e então ajuste o ");
printf(" \n trimpot de offset do TL081 até zerar a leitura GND do PC. ");
c=getchar(); /* Aguarda pressão de tecla */
volt_rep();
}

void carga_dut (void)
{
char c;
clrscr();
printf("\n\n          AJUSTE DA CARGA DO DUT                               ");
printf("\n\n Instruções:                               ");
printf("\n\n -Retirar qualquer ampop do texttool.                               ");
printf("\n\n -Medindo a resistência de carga, incluindo a CH analógica, ");
printf(" \n ajustar o trimpot de carga até obter 2000 ohms. ");
printf("\n\n -Pressionar [Enter] para concluir.                               ");
liga_carga(); /* Fecha a chave que liga a carga */
c=getchar(); /* Aguarda pressão de tecla */
}

void amplitude (void)
{
char c;
clrscr();
printf("\n\n          AJUSTE DA AMPLITUDE DA SENOIDE                               ");
printf("\n\n Instruções:                               ");
printf("\n\n -Retire o resistor de 1K em série com o trimpot de ajuste ");
printf(" \n de frequência e coloque 1Mohm.                               ");
printf("\n\n -Depois de executar a instrução acima precione [Enter] e ");
printf(" \n então ajuste o trimpot de amplitude da senoide, isto é, ");
printf(" \n ganho do 741, até obter 20Vpp na leitura de Vc.                               ");
set_vc(20); /* Faz Vc ser ligado à senoide */
c=getchar(); /* Aguarda pressão de tecla */
volt_rep();
printf("\n\n -Devolver o resistor de 1K no lugar.                               ");
printf("\n\n Pressione [Enter].                               ");
while(!kbhit()); /* Aguarda pressão de tecla */
}

/* Programa auxiliar de ajuste dos trimpots do instrumento */

void ajuste(void)
{
char s=0;
while(s==0)
{
clrscr(); printf("\n\n");
printf("          AJUSTE DO INSTRUMENTO                               \n\n");
printf(" [1] Ajuste do offset do A/D                               \n\n");
printf(" [2] Ajuste do ganho do A/D                               \n\n");
printf(" [3] Ajuste do offset do AGP                               \n\n");
printf(" [4] Ajuste da carga do DUT                               \n\n");
printf(" [5] Ajuste da amplitude da senoide \n\n");
printf(" [Q] Sair                               \n\n");
printf(" Os ajustes devem ser feitos em sequência, de 1 a 5 \n");
printf(" Pressione a tecla correspondente à opção desejada:");
switch (getch())

```

```

    {
        case '1':    offset_ad ();        break;
        case '2':    ganho_ad  ();        break;
        case '3':    offset_agp();        break;
        case '4':    carga_dut ();        break;
        case '5':    amplitude ();        break;
        case 'q':     s = 1;              break;
        case 'Q':     s = 1;              break;
        default:      ;
    }
}

/*****
/*
    FUNÇÃO PRINCIPAL QUE APRESENTA O MENU DE OPÇÕES
*/
void main(void)
{
    char s=0;
    while(s==0)
    {
        clrscr();
        printf("\n\n");
        printf("      MENU PRINCIPAL  \n\n");
        printf(" [1] Teste Bom/Ruim  \n\n");
        printf(" [2] Medida de Parâmetros  \n\n");
        printf(" [3] Teste do instrumento  \n\n");
        printf(" [4] Ajuste do instrumento  \n\n");
        printf(" [Q] Sair \n\n");
        printf(" Pressione a tecla correspondente à opção desejada:");
        switch (getch())
        {
            case '1':    teste();        break;
            case '2':    param();        break;
            case '3':    verif();        break;
            case '4':    ajuste();        break;
            case 'q':     s = 1;          break;
            case 'Q':     s = 1;          break;
            default:      ;
        }
    }
}

```


APÊNDICE 5

CÁLCULOS DOS ERROS

Será calculado o erro do Instrumento para cada parâmetro, como uma porcentagem do valor medido. Os erros dependentes dos próprios parâmetros do DUT não serão calculados devido à complexidade envolvida, já que os parâmetros só serão conhecidos após medi-los, com exceção do erro em I_{io} causado por I_b . No cálculo dos erros também não foi incluído o erro do voltímetro utilizado para ajustar os circuitos pois, sendo escolhido com menos da metade do erro do parâmetro com menor erro, praticamente não influi nos valores calculados.

Erro do Laço, comum a todas as medidas

O único erro do Laço comum a todas as medidas são os das chaves analógicas e resistores da realimentação.

O S/H não causa erros devido à modificação do procedimento de medida, item 3.2.

De acordo com as folhas de dados e medidas feitas, as chaves analógicas foram consideradas tendo $100\Omega \pm 100\Omega$ de resistência.

O pior caso ocorre com ganho do Laço de 1001, quando uma chave analógica está em série com o resistor de $10K\Omega$ na realimentação. Assim a chave provoca um erro sobre o resistor de:

$$\text{Erro(chave)} = \frac{\pm 100\Omega \cdot 100\%}{10K\Omega} = \pm 1\%$$

Também tem-se as tolerâncias de 1% e $CT=80\text{ppm}/^\circ\text{C}$ dos resistores de 10Ω e $10K\Omega$ de realimentação do Laço. Considerando $\Delta T = \pm 45^\circ\text{C}$:

$$\text{Erro}(T) = (80\text{ppm}/^\circ\text{C}) \cdot (\pm 45^\circ\text{C}) \cdot 0,0001\% = 0,36\%$$

$$\text{Finalmente: Erro(Laço)} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 0,36^2 + 0,36^2} = \pm 1,8\%$$

Erro do SAD.

a) Erro do AMUX.

Como Multiplexadores Analógicos causam erros desprezíveis, é prática comum não calculá-los. Mesmo a resistência do canal selecionado (chave fechada) não causa erro, já que o AGP tem resistência de entrada elevada, devido à configuração não inversora.

b) Erro do AGP.

Parâmetros do TL081 e TL082:

$$V_{io}=3\text{mV (tip)}$$

$$\text{CMRR}=86\text{dB}=20.000 \text{ (tip)}$$

$$I_b=50\text{nA (max a } 125^\circ\text{C)}$$

$$I_{io}=20\text{nA (max a } 125^\circ\text{C)}$$

$$CT(V_{io})=18\mu\text{V}/^\circ\text{C (tip)}$$

$$\Delta T=\pm 45^\circ\text{C (Adotado)}$$

$$K_{e2}=18.10^{-9} \text{ V} / \sqrt{\text{Hz}} \text{ Ruído branco de tensão.}$$

A resistência equivalente vista pela entrada não inversora do AGP é $0\text{K}\Omega$, exceto na medida de V_{op} com ganho(G)=1, quando é $50\text{K}\Omega$. Conforme $G=1$ ou $G=10$, a resistência vista pela entrada inversora é $0\text{K}\Omega$ ou $10\text{K}\Omega$.

$$\text{-Erro devido a } CT(V_{io}): \Delta V_o = G \cdot CT(I_b) \cdot \Delta T = 10 \cdot 18\mu\text{V}/^\circ\text{C} \cdot 45^\circ\text{C} = 8\text{mV}$$

$$\text{Percentualmente: } \Delta V_o \cdot 100\% / 1\text{V} = 0,8\%$$

$$\text{-Erro devido a } I_b: \Delta V_o = R \cdot G \cdot I_b = 10\text{K}\Omega \cdot 10 \cdot 50\text{nA} = 5\text{mV}$$

$$\text{Percentualmente: } \Delta V_o \cdot 100\% / 1\text{V} = 0,5\%$$

$$\text{-Erro devido a } I_{io}: \Delta V_o = R \cdot G \cdot I_{io} = 10\text{K}\Omega \cdot 10 \cdot 20\text{nA} = 2\text{mV}$$

$$\text{Percentualmente: } \Delta V_o \cdot 100\% / 1\text{V} = 0,2\%$$

-Erro devido ao CMRR: Com $G=10$ pode-se ter até $V_{cm}=1\text{V}$ nas entradas, portanto teria-se $\Delta V_o = V_{cm} \cdot A_{cm}$ na saída que, devido à realimentação, é reduzido para:

$$\Delta V_o = V_{cm} \cdot A_{cm} \cdot G / A_d = G \cdot V_{cm} / \text{CMRR} = 10 \cdot 1\text{V} / 20000 = 0,5\text{mV}$$

$$\text{Percentualmente: } V_o \cdot 100\% / 10\text{V} = 0,05\%$$

Obs.: No cálculo do erro percentual acima usou-se 10V , pois essa é a saída do AGP para $G=10$ e $V_i = V_{cm} = 1\text{V}$.

-Ruído: A tensão eficaz de ruído na saída do AGP é predominantemente ruído branco:

$$V_{op} = A_v \cdot K_{e2} \sqrt{\text{PGB}} = 16\mu\text{V} \text{ Onde: } A_v=10 \text{ Maior ganho do AGP.}$$

$\text{PGB} = 5 \cdot f_c = 5 \cdot 1600\text{Hz} = 8\text{KHz}$ Meia década maior que a frequência de corte f_c do filtro RC na saída do AGP.

Isto representa um erro de: $(5.16\mu V.100\%)/1V=0,01\%$ Onde o coeficiente 5 é para obtenção do valor de pico do ruído.

$$\text{-Erro total do AGP: } \sqrt{0,8^2 + 0,5^2 + 0,2^2 + 0,05^2 + 0,01^2} = 1\%$$

c) Erro do A/D.

Como o A/D é de 12 bits e a faixa de conversão é de 20V de amplitude: $1 \text{ LSB} = 20V/4096 = 4,88mV$.

-Erro de quantização: O A/D foi ajustado de forma que com 0V e 9,9V em sua entrada são obtidos 0V e 9,9V no PC. Esse procedimento simples leva a um erro de quantização máximo de $\pm 1 \text{ LSB}$.

-Erro de linearidade: $\pm 0,5 \text{ LSB}$ de $0^\circ C$ a $70^\circ C$.

-Erro de calibração de fundo de escala considerado de $0^\circ C$ a $70^\circ C$, quando ajustado à $25^\circ C$: $\pm 0,12\%FS$.

Obs.: $\pm 0,12\%FS = \pm 0,0012.20V/4,88mV = \pm 4,9LSB$.

-Deriva do desvio bipolar: $\pm 1LSB$ de $0^\circ C$ a $70^\circ C$.

Agrupando todos os erros: $\pm \sqrt{1^2 + 0,5^2 + 4,9^2 + 1^2} = \pm 5,1LSB$.

Em milivolts $\pm 5,1LSB$ significa $\pm 5,1LSB.4,88mV = \pm 25mV$.

Percentualmente e em relação à menor tensão de entrada considerada do A/D (1V) tem-se: $\pm 25mV.100\%/1V = 2,5\%$.

Assim o erro do A/D é 2,5%.

$$\text{d)Erro Total do SAD: } \sqrt{1^2 + 2,5^2} = 2,7\%$$

Erro em cada parâmetro medido.

Os parâmetros são calculados através de duas ou mais medidas efetuadas, contendo, cada uma delas, um erro, cuja maior parcela é proveniente da tolerância dos resistores e variações com a temperatura. Como as várias medidas para obtenção de um parâmetro são efetuadas na mesma temperatura e com os mesmos resistores, os erros não são acumulados e as vezes até

parcialmente cancelados. Assim o erro em cada parâmetro será considerado o erro em uma única medida efetuada para aquele parâmetro.

a) Erro em Vio.

É composto pelo erro do Laço e o erro do SAD: $\sqrt{1,8^2 + 2,7^2} = 3,2\%$

b) Erro em Ib.

É composto pelo erro do SAD, o erro do Laço e o erro devido às chaves e resistores nas entradas do DUT.

-Devido às chaves e resistores nas entradas do DUT: O pior caso é relativo ao erro dos dois resistores de $10K\Omega$ e suas chaves em paralelo. Cada chave analógica tem $\pm 100\Omega$ de tolerância que significa 1% de erro no resistor de $10K\Omega$ que ainda apresenta a sua própria tolerância de 1% e $CT=80ppm$. O $CT=80ppm$ com $\Delta T = \pm 45^\circ C$ resulta em 0,36% de erro; Assim:

$$\text{Erro}(CH,R) = \sqrt{1^2 + 1^2 + 0,36^2 + 0,36^2 + 1^2 + 1^2} = 2,1\%.$$

$$\text{-Erro total em Ib: } \sqrt{1,8^2 + 2,7^2 + 2,1^2} = 3,9\%$$

c) Erro em Iio.

O erro nesse parâmetro é o mesmo que o erro total em Ib acrescido do erro que Ib provoca em Iio.

-Erro em Iio provocado por Ib devido ao descasamento dos resistores nas entradas do DUT: Em cada uma das duas entradas do DUT, Ib provoca uma variação do desvio de $Ib \cdot 1\% \cdot R$ devido à tolerância e $Ib \cdot 0,36\% \cdot R$ devido ao CT do resistor de $10K\Omega$ ou $100K\Omega$ utilizado. Essas variações aparecem como erros absolutos de $1\%Ib$ e $0,36\%Ib$ em Iio medido. Dessa forma o erro total absoluto em Iio é:

$$\text{Erro(devido Ib)} = \sqrt{(1\%)^2 + (1\%)^2 + (0,36\%)^2 + (0,36\%)^2} Ib = 1,5\%Ib.$$

-Erro total em Iio: $\pm 3,9\% \pm 1,5\%Ib$. Isto significa que, se for medido $Ib=200nA$ e $Iio=20nA$, O erro de 3,9% será combinado com $1,5\%Ib=3nA \Rightarrow 3nA \cdot 100\%/20nA=15\%$, resultando em 15,5% de erro total em Iio.

d) Erro em Ad e CMRR.

É composto pelo erro do SAD, erro do Laço, erro devido aos detectores de pico e o erro na excursão pico a pico da senoide.

-Devido aos detectores de pico:

O detector de pico positivo deve deter picos de no mínimo 100mV, portanto como o TL82 possui $V_{io}(tip)=3mV$ e não foi compensado:

$$\text{erro}(V_{io}) = 3mV \cdot 100\% / 100mV = 3\%$$

I_b e I_{io} não causam erros pois não há resistores.

A frequência usada é de 2,5Hz; cuja período é $T=0,4s$; assim:

Queda de tensão em um período no C: $\Delta V = I \cdot T / C = V_c \cdot T / RC$.

$$\text{Logo: } \text{Erro}(C) = VT100\% / VRC = T100\% / RC = 0,4 \cdot 100\% / 1M\Omega \cdot 10\mu F = 4\%$$

$$\text{Portanto: } \text{Erro}(\text{detector}) = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5\%.$$

Obs.: O detector de pico negativo apenas amplia a faixa de medição de V_s^* , contribuindo para a diminuição do erro total acima, e não para o seu aumento como poderia parecer a primeira vista.

-Erro na excursão pico a pico da senoide.

Como a amplitude pico a pico da senoide é ajustada através de um "trimpot" de $CT=200ppm/^{\circ}C$ chega-se a:

$$\text{erro}(CT) = 200\mu \cdot 100\% \cdot 45^{\circ}C = 0,9\%$$

$$\text{-Erro total em Ad e CMRR: } \sqrt{1,8^2 + 2,7^2 + 5^2 + 0,9^2} = 6\%$$

e) Erro em Vop.

É composto pelo erro do SAD, erro do Laço e o erro devido aos 2 resistores de 100K que formam o divisor em V_o .

-Devido à tolerância de 1% e $CT=80ppm/^{\circ}C$ dos 2 resistores, tem-se a seguinte contribuição de erro:

$$\text{erro}(R) = \sqrt{1^2 + 1^2 + 0,36^2 + 0,36^2} = 1,5\%$$

$$\text{-Erro total em Vop: } \sqrt{1,8^2 + 2,7^2 + 1,5^2} = 3,6\%$$

APÊNDICE 6

VALORES MEDIDOS PELO PROTÓTIPO

Neste Apêndice são apresentadas tabelas de valores de parâmetros de quatro ampops medidos pelo protótipo, do tipo 741 e 081, com o objetivo de esclarecer o desempenho atual do protótipo. Cada folha é dedicada a uma única unidade e apresenta o processo de aquecimento do ampop nos primeiros 10s, dos 20s de aquecimento. Após essas medidas são apresentados dois conjuntos de medidas completos, em equilíbrio térmico, realizados com intervalo de 10 min.

$\mu A741$	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	1.097					
2	1.112					
3	1.115					
4	1.114					
5	1.128					
6	1.128					
7	1.128					
8	1.125					
9	1.117					
10	1.122					

$\mu A741$	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	1.131	68.8	4.9	316.8	25.5	12.7 -12.3
2	1.134	67.4	5.4	312.9	25.4	12.7 -12.2
3	1.137	68.8	5.9	326.5	25.7	12.7 -12.2
4	1.140	66.5	5.1	279.6	25.9	12.7 -12.3
5	1.132	68.2	3.6	293.4	25.1	12.7 -12.3
6	1.122	67.3	7.2	314.8	25.4	12.7 -12.3
7	1.138	69.2	4.8	317.0	25.9	12.7 -12.2
8	1.136	65.0	2.8	315.1	25.2	12.7 -12.2
9	1.130	66.2	6.1	262.6	25.1	12.7 -12.3
10	1.135	70.4	3.7	307.0	25.8	12.7 -12.3
Media	1.134	67.8	4.9	304.6	25.5	12.3
				109.7dB	88.1dB	
Disp+- 99,7%	0.6%	3.2%	36.2%	9.0%	1.7%	0.1%

$\mu A741$	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	1.138	69.8	4.3	309.1	25.9	12.7 -12.3
2	1.130	69.3	3.5	302.6	25.3	12.7 -12.3
3	1.131	67.6	5.6	301.7	25.1	12.8 -12.3
4	1.135	70.1	5.2	303.5	25.6	12.7 -12.3
5	1.128	72.5	2.9	296.8	25.5	12.7 -12.2
6	1.126	68.8	3.7	297.9	25.6	12.7 -12.3
7	1.125	66.6	3.2	312.9	25.4	12.7 -12.3
8	1.132	71.1	5.3	300.1	25.8	12.7 -12.3
9	1.132	65.7	5.0	298.4	25.3	12.7 -12.3
10	1.126	69.5	7.2	290.9	25.1	12.7 -12.3
Media	1.130	69.1	4.6	301.4	25.5	12.3
				109.6dB	88.1dB	
Disp+- 99,7%	0.5%	4.0%	39.5%	2.8%	1.5%	0.2%

LM741	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	0.857					
2	0.876					
3	0.886					
4	0.894					
5	0.897					
6	0.897					
7	0.891					
8	0.901					
9	0.898					
10	0.898					

LM741	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	0.901	59.6	1.9	300.8	800.8	13.9 -13.1
2	0.903	58.5	6.3	260.6	536.0	13.8 -13.1
3	0.900	63.5	4.0	269.8	580.5	13.8 -13.1
4	0.900	62.9	1.8	288.2	794.5	13.8 -13.1
5	0.900	58.6	2.1	307.2	638.1	13.9 -13.1
6	0.903	63.2	1.7	315.6	555.8	13.9 -13.1
7	0.898	62.3	1.5	289.8	743.5	13.9 -13.1
8	0.897	60.0	2.0	293.2	780.7	13.8 -13.1
9	0.901	58.3	6.5	299.7	569.9	13.8 -13.1
10	0.902	59.1	3.4	315.8	626.3	13.9 -13.1
Media	0.900	60.6	3.1	294.1	662.6	13.1
				109.4dB	116.4dB	
Disp+- 99,7%	0.3%	4.8%	83.5%	8.4%	21.9%	0.1%

LM741	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	0.893	62.1	3.7	304.2	496.6	13.8 -13.1
2	0.893	60.3	3.4	243.5	676.4	13.8 -13.1
3	0.892	61.4	3.4	286.8	605.7	13.9 -13.1
4	0.894	61.0	1.5	294.7	635.1	13.9 -13.1
5	0.895	64.3	3.1	301.3	690.3	13.8 -13.1
6	0.895	59.8	2.3	290.0	651.4	13.9 -13.1
7	0.893	58.5	3.9	266.9	613.9	13.8 -13.1
8	0.897	60.9	1.2	271.0	553.5	13.9 -13.1
9	0.893	62.6	2.2	269.9	650.4	13.8 -13.1
10	0.895	61.4	3.5	289.8	614.9	13.8 -13.1
Media	0.894	61.2	2.8	281.8	618.8	13.1
				109.0dB	115.8dB	
Disp+- 99,7%	0.2%	3.5%	46.6%	9.1%	12.8%	0.1%

TL081	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	-0.003					
2	0.018					
3	0.035					
4	0.040					
5	0.046					
6	0.048					
7	0.049					
8	0.054					
9	0.054					
10	0.058					

TL081	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	0.066	1.2	0.4	348.4	140.4	12.6 -11.9
2	0.063	0.4	0.5	346.3	139.0	12.6 -11.9
3	0.063	3.0	2.0	334.6	142.6	12.6 -11.9
4	0.066	5.1	1.7	347.8	142.8	12.6 -11.9
5	0.063	2.3	0.1	349.6	140.8	12.6 -11.9
6	0.063	1.0	2.3	330.8	139.0	12.6 -11.9
7	0.063	2.2	2.2	350.2	141.1	12.6 -11.9
8	0.064	7.0	2.5	341.9	139.1	12.6 -11.9
9	0.063	3.6	2.0	351.7	137.9	12.6 -11.9
10	0.062	3.3	2.9	348.7	139.3	12.6 -11.9
Media	0.064	2.9	1.6	345.0	140.2	11.9
Disp+- 99,7%	2.8%	93.6%	81.2%	110.8dB 2.8%	102.9dB 1.6%	0.1%

TL081	Vio [mV] +-3%	Ib [nA] +-4%	Iio [nA] +-4%+-1.5%Ib	Ad [K] +-6%	CMRR [K] +-6%	Vop [V] +-3.5%
1	0.0508	4.1	2.3	351.7	140.0	12.6 -11.9
2	0.050	1.3	2.7	347.2	139.3	12.6 -11.9
3	0.050	5.9	2.3	343.4	141.6	12.6 -11.9
4	0.051	1.9	1.0	339.6	138.4	12.6 -11.9
5	0.051	2.0	1.9	338.5	140.5	12.6 -11.9
6	0.051	0.7	2.9	357.3	140.7	12.6 -11.9
7	0.050	0.8	0.3	347.8	142.0	12.6 -11.9
8	0.051	2.3	1.5	339.9	140.8	12.6 -11.9
9	0.052	3.0	2.9	339.6	141.0	12.6 -11.9
10	0.053	3.7	2.1	346.0	140.7	12.6 -11.9
Media	0.051	2.6	2.0	345.1	140.5	11.9
Disp+- 99,7%	2.3%	87.2%	57.3%	110.8dB 2.4%	103.0dB 1.0%	0.2%

CA741	Vio [mV] +3%	Ib [nA] +4%	Iio [nA] +4%+-1.5%Ib	Ad [K] +6%	CMRR [K] +6%	Vop [V] +3.5%
1	0.663					
2	0.665					
3	0.669					
4	0.669					
5	0.668					
6	0.668					
7	0.669					
8	0.667					
9	0.670					
10	0.667					

CA741	Vio [mV] +3%	Ib [nA] +4%	Iio [nA] +4%+-1.5%Ib	Ad [K] +6%	CMRR [K] +6%	Vop [V] +3.5%
1	0.668	190.4	4.6	158.3	108.3	13.8 -12.5
2	0.668	188.9	5.2	163.8	111.8	13.8 -12.5
3	0.670	187.9	5.0	147.0	110.1	13.8 -12.5
4	0.668	193.3	7.4	158.8	109.9	13.8 -12.5
5	0.660	185.2	4.9	162.4	111.3	13.8 -12.5
6	0.666	188.2	7.1	162.4	112.2	13.8 -12.5
7	0.667	186.3	1.9	158.2	111.6	13.8 -12.5
8	0.665	187.8	4.2	154.6	112.5	13.8 -12.5
9	0.668	187.3	4.1	158.4	110.6	13.8 -12.5
10	0.667	188.1	5.1	162.9	109.7	13.8 -12.5
Media	0.667	188.3	4.9	158.7	110.8	12.5
Disp+- 99,7%	0.5%	1.6%	42.9%	104.0dB 4.3%	100.9dB 1.6%	0.1%

CA741	Vio [mV] +3%	Ib [nA] +4%	Iio [nA] +4%+-1.5%Ib	Ad [K] +6%	CMRR [K] +6%	Vop [V] +3.5%
1	0.676	189.1	1.0	157.4	105.5	13.8 -12.5
2	0.677	190.3	1.2	162.7	111.1	13.8 -12.5
3	0.677	193.9	1.3	150.0	111.7	13.8 -12.5
4	0.674	190.9	0.8	160.0	110.5	13.8 -12.5
5	0.676	189.3	1.6	155.6	113.6	13.8 -12.5
6	0.664	185.4	1.9	146.6	108.6	13.8 -12.5
7	0.676	191.5	1.6	158.4	111.4	13.8 -12.4
8	0.674	187.7	1.4	159.6	111.4	13.8 -12.5
9	0.668	190.6	2.4	155.4	114.0	13.8 -12.5
10	0.672	190.8	0.5	156.8	109.0	13.8 -12.5
Media	0.673	190.0	1.4	156.2	110.7	12.5
Disp+- 99,7%	0.9%	1.6%	55.7%	103.9dB 4.2%	100.9dB 3.1%	0.1%